



## 저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學博士學位論文

열탄성 감쇠 특성을 이용한 높은 Q-지수  
비정질 수정 공진자에 관한 연구

A study on high-Q value fused quartz resonator using  
thermoelastic damping characteristic

2014 년 2 월

서울대학교 대학원

전기 정보 공학부

송 은 석



# 초 록

본 논문에서는 열탄성 감쇠로 인한 에너지 손실이 적은 비정질 수정 물질을 이용하여 높은 Q 지수의 MEMS 공진자를 구현하고자 하였다. 이를 위하여 비정질 수정의 열탄성 감쇠 특성을 Q 지수에 반영하기 위한 설계 방법을 제안하고, 비정질 수정 공진자의 웨이퍼 수준 제작을 위하여 수정-수정 웨이퍼 직접 접합 공정 및 건식 식각 공정을 확립하였다. 제안된 설계 방법과 공정 방법을 통하여 비정질 수정 기반의 MEMS 공진자를 제작하였고, 동일 설계의 단결정 실리콘 공진자와의 비교를 통하여 향상된 Q 지수를 실증하였다.

먼저 높은 Q 지수의 설계 기준을 마련하기 위하여, 공진자의 내부 에너지 손실 요인인 열탄성 감쇠와 지지부 감쇠에 대하여 분석하였으며, 각각 비정질 수정과 단결정 실리콘으로 이루어진 fixed-fixed bridge 구조 공진자의 길이, 폭 및 공진 주파수에 대하여 에너지 손실 요인을 종합적으로 고려한 Q 지수의 특성을 도출하였다. 이를 바탕으로 최적화된 Q 지수의 비정질 수정 DETF(double-ended tuning fork) 공진자를 설계하였으며, 공진자의 치수에 따른 Q 지수의 특성을 유한요소해석을 통하여 비교 검증하였다.

비정질 수정 공진자의 웨이퍼 단위 제작을 위해 O<sub>2</sub> 플라즈마 처리를 통한 300 °C 이하의 QoQ(quartz on quartz) 저온 직접 접합 공정을 확립하였으며, 접합 웨이퍼의 잔류 응력, 접합력 및 접합의 재현성 실험을 통해 공정의 효용성 및 신뢰성을 확인하였다. 또한 접합 웨이퍼의 건식 식각을 위하여, Ni 마스크와 산소 및 탄화불소가스 조합을 이용한 식각 실험을 진행하여 깊이 40  $\mu\text{m}$ , 측면 손실 3  $\mu\text{m}$  수준의 이방성 건식 식각 조건을 마련하였다.



제안된 QoQ 접합 및 이방성 건식 식각 공정을 통하여 구조물 및 지지기판이 모두 비정질 수정으로 이루어진 DETF 공진자를 성공적으로 제작하였으며, 자가발진 및 ring-down test 를 통하여 공진자의 Q 지수를 측정하였다.

본 논문에서 제작된 비정질 수정 DETF 공진자와 동일 구조의 단결정 실리콘 DETF 공진자의 비교 실험 결과, 평균 Q 지수는 84,000 ( $\pm 17,000$ )과 63,000 ( $\pm 7,000$ )으로 각각 측정되어 비정질 수정 공진자의 우수한 공진 특성을 실험적으로 확인할 수 있었다.

본 논문에서 제안한 Q 지수의 설계 방법과 비정질 수정물질의 MEMS 공정 적용 방안을 통하여 높은 Q-지수를 갖는 공진자의 제작과 비정질 수정 기반의 고성능 소자의 개발 가능성을 확인할 수 있었으며, 본 연구 결과의 확장을 통하여 기존의 실리콘 위주로 개발되던 MEMS 소자의 미진했던 연구 분야에 대하여 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 : 비정질 수정, 열탄성 감쇠, Q 지수, 수정-수정 웨이퍼 접합,  
수정 건식 식각, DETF-공진자

학 번 : 2009-30194

# 목 차

국문초록	i
목차	iv
표 목차	vi
그림 목차	vii
제 1 장 서론	1
1.1 연구의 배경	1
1.2 고성능 관성 센서의 필요성	3
1.3 고성능 관성 센서의 판단 기준	6
1.4 높은 Q 지수에 대한 연구 동향	10
1.5 연구의 동기	14
1.6 연구의 목적	17
1.7 논문의 구성	18
제 2 장 Q 지수 분석	19
2.1 Q 지수의 개념	19
2.2 에너지 손실 요인	22
2.3 비정질 수정과 단결정 실리콘의 Q 지수 분석	36
제 3 장 수정-수정 접합 공정	46
3.1 직접 접합의 특징 및 접합 메커니즘	46
3.2 수정-수정 직접 접합 공정	53
제 4 장 비정질 수정의 건식 식각	69
4.1 수정 건식 식각에 대한 문헌조사	69
4.2 수정 건식 식각 메커니즘	74

4.3 수정 건식 식각의 마스크 및 식각 실험	77
제 5 장 공진자의 설계 및 제작	99
5.1 공진 주파수 설계	99
5.2 DETF 공진자의 구조 설계	100
5.3 공정도	107
5.4 제작 결과	109
제 6 장 공진자 구동 실험	113
6.1 정전 구동 및 자가 발진 실험	113
6.2 Q 지수 측정 실험	117
제 7 장 결과 및 토의	121
7.1 실험 결과의 정리	121
7.2 Q 지수의 향상을 위한 디자인 방안	124
제 8 장 결론	128
참고 문헌	131
Abstract	138

# 표 목 차

표 1-1. 상용화된 MEMS 6 축 콤보 센서의 성능 및 특징	2
표 1-2. 콤보 센서의 기능에 따른 성능 요구치	4
표 1-3. 전기적 감도식의 설계 변수	7
표 1-4. 바이어스 안정도의 설계 변수	8
표 2-1. Zener' eq.의 물질 상수값	28
표 3-1. 접합 웨이퍼의 열응력 측정 결과	58
표 3-2. O <sub>2</sub> 플라즈마 처리 시 고정변인	59
표 3-3. 재연성 실험 정리표	68
표 4-1. SiO <sub>2</sub> DRIE 공정	73
표 4-2. 마스크 별 식각 특징	78
표 4-3. Under-cut 개선 실험 1 의 결과	94
표 4-4. Under-cut 개선 실험 2 의 결과	95
표 4-5. 식각 가스 변경 실험 결과	96
표 4-6. 식각 & 폴리머 증착 실험 결과	98
표 5-1. DETF 공진자의 설계 변수	101
표 5-2. 제작된 비정질 수정 DETF 공진자의 치수	110
표 5-3. 제작된 단결정 실리콘 DETF 공진자의 치수	112
표 6-1. 광학 측정 조건	113
표 6-2. 측정된 Q 지수 (비정질 수정 DETF)	118
표 6-3. 측정된 Q 지수(단결정 실리콘 DETF)	120

# 그림 목 차

그림 1-1. 향후 확대될 MEMS 관성센서의 기능.(2011 년 yole. 분석자료)-----	3
그림 1-2. Epson 사의 6 축 관성 센서 -----	5
그림 1-3. HRG : (a) 초기 모델, (b) 비정질 수정 모델, (c) wine-glass 모드 공진 -----	11
그림 1-4. DRG : (a) 비정질 수정 기반의 DRG, (b) DRG 의 구조물, (c) 구동 및 감지 전극 패턴 -----	12
그림 1-5. BRG : (a) 비정질 수정으로 제작된 BRG, (b) BRG 단면도, (c) blow-torch molding 공정도 -----	13
그림 2-1. Damped-vibration 모델 -----	19
그림 2-2. 주파수 응답 곡선과 3 dB band-width -----	20
그림 2-3. 압력에 따른 공기 감쇠에 의한 Q 지수의 변화 -----	23
그림 2-4. 열탄성 감쇠-----	25
그림 2-5. 상대주파수 값에 따른 Q 함수의 곡선 변화-----	26
그림 2-6. 비정질 수정과 단결정 실리콘의 열탄성 감쇠 Q 곡선 -----	29
그림 2-7. 길이의 변화에 따른 열탄성 감쇠 Q 곡선의 변화-----	31
그림 2-8. 지지부 감쇠의 모식도 -----	32
그림 2-9. 길이 변화에 따른 지지부 감쇠 Q 곡선의 변화 -----	34
그림 2-10. 열탄성 감쇠와 지지부 감쇠를 고려한 Q 곡선 (비정질 수정)-----	37
그림 2-11. 열탄성 감쇠와 지지부 감쇠를 고려한 Q 곡선(단결정실리콘)-----	38

그림 2-12. 비정질 수정과 단결정 실리콘의 Q 곡선 비교	40
그림 2-13. 비정질 수정 과 단결정 실리콘의 높은 Q 지수 영역	41
그림 2-14. 서로 다른 변수에 의한 Q 지수 곡선	43
그림 2-15. 공진주파수 대비 Q 지수 (비정질 수정 vs 단결정 실리콘)	44
그림 2-16. 공진 주파수 대비 Q 지수 극대점 (비정질 수정)	45
그림 3-1. Eutectic bonding 의 모식도	47
그림 3-2. Anodic bonding 의 모식도	47
그림 3-3. 직접 접합 순서도 : A) 표면 처리 (웨이퍼 세척 및 연마), B) 초기 접합 (분자결합), C) Annealing (공유 결합)	48
그림 3 - 4. a) 물 분자층을 매개로한 접합 상태, b) 두 OH 기의 van der Waals 힘을 이용한 접합 상태, c) Si-O-Si 결합을 통한 접합 상태	50
그림 3-5. (a) HF 분자를 매개로 한 접합 상태, (b) H 와 F 원자간의 van der Waals 힘에 의한 접합 상태, (c) Si-Si 공유결합을 통한 접합 상태	51
그림 3-6. 열처리 온도에 따른 접합력 실험 결과	52
그림 3-7. 수정-수정 직접 접합 순서도	53
그림 3-8. 온도 변화에 따른 열팽창 계수의 변화	56
그림 3-9. 열 응력으로 인한 구조물의 균열	56
그림 3-10. 직접 접합 웨이퍼 : (a) Si-수정 접합 웨이퍼, (b) 수정-수정 접합 웨이퍼	57
그림 3-11. Si-수정 & 수정-수정 접합 웨이퍼의 bending 측정 결과	58
그림 3-12. 수정 웨이퍼의 접촉각 측정 실험	60
그림 3-13. 액적을 이용한 접촉각 측정 모식도	60

그림 3-14. 플라즈마 처리시간에 따른 수정 웨이퍼의 표면에너지 --	
-----	62
그림 3-15. 전단력 측정 기기(a) 와 시편 홀더(b)-----	63
그림 3-16. 제작된 시편의 크기(a)와 전단력을 인가하기 전의 상태 (b), 시편이 깨질 때 까지 전단력을 인가한 모습 (c)-----	64
그림 3-17. 전단력 측정 결과 -----	65
그림 3-18. QoQ 접합 공정의 재연성 실험 결과 -----	67
그림 4-1. Si 마스크를 이용한 수정 이방성 식각 -----	69
그림 4-2. DRIE 를 이용한 미세 가공 예: (a) Pyrex glass 의 DRIE 식각 예, (b) AT-cut quartz 의 DRIE 공정을 이용해 제작된 QCM(quartz crystal microbalance) 소자 -----	69
그림 4-3. STS 의 AOE(advanced oxide etch) 장비를 사용한 SiO <sub>2</sub> 가공 방법 및 예 : (a) 식각 방법 (b) 40 $\mu\text{m}$ 두께의 산화막 식각 프로파일. (c) 0.3 $\mu\text{m}$ 선폭의 산화막 고종횡비 식각 예. (d) 관통 식각 recipe 를 이용한 수정 웨이퍼의 식각 예 -----	72
그림 4-4. 탄화불소 플라즈마에 의한 수정 식각 (I+: 이온 flux, I*: hot neutrals, 점선 : 폴리머층으로의 에너지 전달, 곡선 : 폴리머층으로의 반응기 확산)-----	74
그림 4-5. 단결정 실리콘 마스크를 활용한 수정 공진자 제작 공정-	79
그림 4-6. 단결정 실리콘 마스크를 활용한 웨이퍼 레벨 수정 공진자 제작 결과 -----	80
그림 4-7. 제작된 수정 외팔보 공진자 -----	81
그림 4-8. 제작된 수정 DETF 공진자 -----	81
그림 4-9. 단결정 실리콘 마스크의 Footing 현상 -----	82
그림 4-10. SOI 웨이퍼를 활용한 Si 마스크 제작 공정 순서 ---	83
그림 4-11. SOI 웨이퍼를 활용한 Si 마스크 제작 결과 -----	84

그림 4-12. SOI 마스크를 활용한 수정 공진자 제작 공정	-----86
그림 4-13. 제작된 DETF 수정 공진자의 단면(SOI 마스크)	---87
그림 4-14. 수정 구조물 왜곡 식각의 모식도	-----88
그림 4-15. 도금 몰드 패턴 (감광제 : DNR L-300)	-----89
그림 4-16. Ni 도금 결과	-----90
그림 4-17. 트렌치 구조 식각 결과	-----91
그림 4-18. 반전된 트렌치 구조 식각 결과	-----92
그림 4-19. Under-cut 으로 인한 측면 식각	-----93
그림 4-20. 식각 시간에 따른 under-cut 개선 실험 1	-----94
그림 4-21. 식각시간에 따른 under-cut 양상 실험 결과 2	-----95
그림 4-22. 식각 가스 변경 실험 결과	-----96
그림 4-23. 식각 & 폴리머 증착 실험 결과	-----98
그림 5-1. DETF 공진자의 치수 및 공진주파수 대응 관계	----100
그림 5-2. DETF 공진자의 구조물 치수	-----101
그림 5-3. DETF 공진자 구조 및 정전구동의 모식도	-----102
그림 5-4. DETF 공진자 마스크	-----103
그림 5-5. 열탄성 감쇠에 대한 시뮬레이션 및 이론값	-----104
그림 5-6. 지지부 감쇠에 대한 시뮬레이션 및 이론값	-----105
그림 5-7. 비정질 수정 DETF 공진자의 Q 지수 예상 곡선	---106
그림 5-8. 단결정 실리콘 DETF 공진자의 예상 Q 지수 곡선	--106
그림 5-9. 비정질 수정 DETF 공진자 공정도	-----108
그림 5-10. 웨이퍼 단위로 제작된 비정질 수정 DETF 공진자	--109
그림 5-11. 비정질 수정 DETF 공진자 SEM 촬영 결과	-----110
그림 5-12. 제작된 단결정 실리콘 DETF 공진자	-----111
그림 6-1. 광학 sweep 측정 결과	-----114
그림 6-2. 자가발전 회로 구성도	-----115



그림 6-3. 비정질 수정 DETF 공진자의 자가발진 결과	-----115
그림 6-4. Tuning-fork 모드 자가발진	-----116
그림 6-5. Ring-down test 결과 (비정질 수정 DETF)	-----117
그림 6-6. Ring-down test 결과 (단결정 실리콘 DETF)	-----119
그림 7-1. 비정질 수정 및 단결정 실리콘 DETF 의 Q 지수 비교	-----121
그림 7-2. 비정질 수정 DETF 공진자의 예상 Q 지수 및 측정 Q 지수	-----122
그림 7-3. 단결정실리콘 DETF 공진자의 예상 Q 지수 및 측정 Q 지수	-----123
그림 7-4. 동일 치수의 비정질 수정 (a) 및 단결정 실리콘 (b) DETF 공진자의 주파수 변화에 따른 Q 지수 변화 양상 (길이 $L = 1695 \mu\text{m}$ )	-----124
그림 7-5. 지지부 감쇠를 줄이기 위한 free-free beam 공진자 : (a) FF-beam 의 공진 모드, (b) polysilicon 으로 제작된 FF-beam	-----126
그림 7-6. 제안된 공진자 디자인 모식도	-----126



# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구의 배경

오늘날 자이로스코프(gyroscope) 및 가속도계와 같은 관성 센서는 군사분야는 물론 민간 항공기, 자동차, 로봇 및 게임기에 이르기까지 수요가 점점 늘어나고 있다. 이러한 관성센서는 오늘날의 과학기술의 발전 더불어 기술적 진보를 이루어왔다. 특히 반도체 제조공정 기술을 근간으로 한 MEMS 기술을 응용하여 제작된 각종 관성 센서들은 과거의 크고 무겁고, 전력소모가 많은 기계식 관성장치의 단점을 극복하면서도 훨씬 저렴한 가격에 제작되고 있어 점점 그 적용범위가 확대되어 가고 있다 [1-3]. 이러한 MEMS 관성 센서는 그 동안 다양한 분야의 수요를 충족하기 위하여 다양한 성능으로 개발되어 왔는데, 주로 실리콘을 기반으로 한 반도체 제조 공정 기술을 통해 제품이 제작되고 있다 [4]. 이러한 실리콘 기반의 MEMS 관성 센서는 그 동안의 반도체 공정 기술의 발달에 힘입어 미세 가공 기술이 잘 발달되어 있기 때문에 제조 공정이 용이하고, 아날로그 회로와의 호환성이 좋은 장점을 갖고 있다.

스마트폰을 비롯한 각종 모바일 기기에 반드시 탑재 되고 있는 지금의 MEMS 관성 센서에 대한 수요는 2000 년대 초반부터 지금까지 꾸준히 증가해왔다. 2000 년대 초반의 수요 및 개발 동향은 자동차 주행 안정성을 위한 ESC(electronic stability control), 혹은 에어백의 트리거 센서와 같은 산업분야와 디지털 카메라의 손떨림 방지와 같은 일부 가전 부분의 시장에 국한되어 있었다. 그러나, 2007 년 가속도 센서 및 자이로스코프가 탑재된 i-Phone 의 등장과 더불어 모바일기기의 사용자 편의를 위한 모션 센싱의 대안으로 떠오르면서 가전용 MEMS 관성센서의 시장은 앞으로의 시장 확대의 큰 축으로 작용할 것으로 보인다.

모바일 가전 시장이 요구하는 관성센서는 자이로스코프의 경우 약 500 °/sec 이상의 바이어스 안정도를 갖는 것으로서 주로 3 축 자이로를 통해 회전(turning), 및 경사 (tilting) 등에 대한 물리적 정보만을 제공하거나, 게임에서의 사용자 편의를 제공하는 데에 국한되어 있다. 따라서 관성센서의 성능향상 보다는 가속도계 혹은, 전자 컴퍼스와 같은 다른 관성센서의 통합을 통하여 6 축 혹은 9 축 자유도를 갖는 융합형 관성 센서의 개발이 주를 이루고 있다 [5].

2011 년 현재, 시장에서 상용화된 6 축 combo 센서는 STMicro, Analog Devices, Invensense 등과 같은 몇몇 선두 연구 그룹들에 의해 시장이 점유 되어 있다. 각 연구 그룹들의 상용화 관성 센서의 성능 및 특징을 아래와 같이 정리하면 아래와 같다.

표 1 - 1. 상용화된 MEMS 6 축 콤보 센서의 성능 및 특징 [5]

6 DoF Inertial measurement units				
Supplier	Product	Package size	Applications	Differentiation
STMicroelectronics	LSM330DLC	4x5x1 mm	Consumer	Select angular up to 2,500 deg/s
Analog Devices	ADIS16360	23x23x23 mm	Industrial	In-run bias stability of $\leq 9\text{mdeg/sec}$
Epson	S4E5A0A0	24x24x10 mm	Industrial	- Bias stability of $\leq 1.6\text{ mdeg/s}$ - lowest angular rate output noise ( $0.24\text{ deg}/\sqrt{\text{Hz}}$ )
Invensense	MPU-6000	4x4x0.9 mm	Consumer	9-axis algorithms processing capability
SensorDynamics	SD746	6x6x1.2 mm	Consumer	Noise density $\leq 0.03\text{ deg/s}/\sqrt{\text{Hz}}$
MEMSense	Micro IMU	2.276-in. dia x 0.956-in. h/t	Rugged Industrial & Military	Includes a magnetometer

## 1.2 고성능 관성 센서의 필요성

MEMS 관성 센서는 앞으로 확대될 시장과 더불어 지금까지의 단순한 물리적 정보 제공에서 벗어나, 옥내-항법(indoor-navigation) 시스템, 보행-항법(pedestrian-navigation) 시스템과 같은 navigator로서의 기능이 점차 요구될 것으로 보인다 [6].

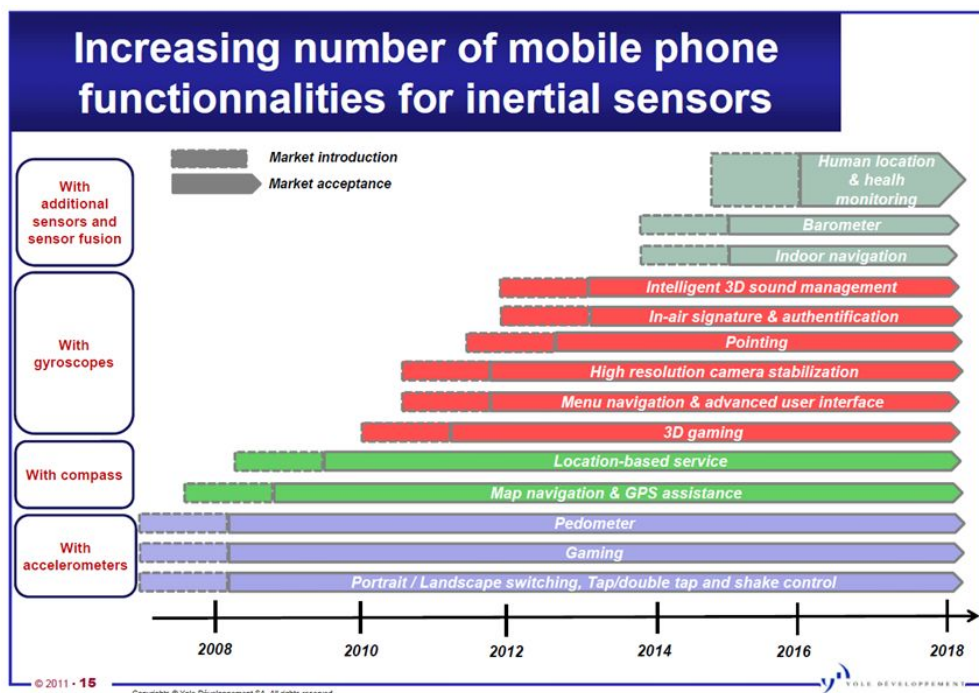


그림 1-1. 향후 확대될 MEMS 관성센서의 기능.(2011년 yole. 분석자료) [6]

옥내 항법 시스템의 경우 2015년 까지 현재의 약 2.16억 달러에서 약 4.3억 달러의 시장으로 확대될 것으로 예상하고 있다. 현재 대부분의 모바일 기기에서 제공하고 있는 navigation 기능은 GPS 신호 및 기지국

간의 거리를 고려한 지도상의 위치 정보만을 제공하고 있으며, 이러한 GPS 기반의 위치정보는 주위의 고층빌딩 혹은, 건물 내부와 같은 GPS 음영지역에서 기능하지 못하는 단점이 있다. 따라서 지금의 모바일 기기에 항법으로서의 기능을 부가하기 위해서는 외부의 신호에 의존하지 않는 추측항법(Dead-Reckoning) 시스템의 구현이 필수적이다. 이러한 추측 항법 시스템의 기능을 수행하기 위한 관성센서는 자이로스코프의 경우 5~100 %/hr (1~30 mdeg/sec) 바이어스 안정도를 갖는 저급 항법 혹은 산업용 수준에서 가능한 것으로 보고되고 있다 [6].

표 1-2. 콤보 센서의 기능에 따른 성능 요구치 [6]

Motion Sensor Combos for Mobile Phones									
<ul style="list-style-type: none"> <li>Many mobile phone functions will benefit from both 3-axis accelerometers and 3-axis gyroscopes</li> <li>Magnetometer is also of interest for other functions</li> <li>=&gt; Increasing interest for 9 axis solutions (discrete packages today)</li> </ul>									
Function	Need for accelerometer axis?			Need for gyroscope axis?			Need for magnetometer axis?		
	$a_x$	$a_y$	$a_z$	$\Omega_x$	$\Omega_y$	$\Omega_z$	$m_x$	$m_y$	$m_z$
Map orientation and location-based service							YES	YES	YES
Image stabilization				YES (<50°/s range)	YES (<50°/s range)				
Gaming	YES	YES	YES	YES (>500°/s)	YES (>500°/s)	YES (>500°/s)	Sometimes	Sometimes	Sometimes
Human Machine Interface (portrait/landscape ...)	YES	YES	YES	Sometimes	Sometimes	Sometimes			
Pointing / Remote control	Sometimes	Sometimes	Sometimes	YES (50-500°/s)		YES (50-500°/s)			
Dead reckoning / Pedestrian navigation	YES	YES	Sometimes	Sometimes	Sometimes	YES (50-500°/s)	YES	YES	YES

지금까지 상용화된 6 축 콤보 센서의 경우, 약 6 %/hr 의 산업용 수준 바이어스 안정도 성능을 보이는 Epson 사의 S4E5A0A0 모델이 가장

좋은 성능을 보이고 있다. 이 모델은 결정질 수정을 기반으로 제작되었으며, 공진자의 Q 지수는 약 30,000 수준으로 보고 되고 있다 [7].

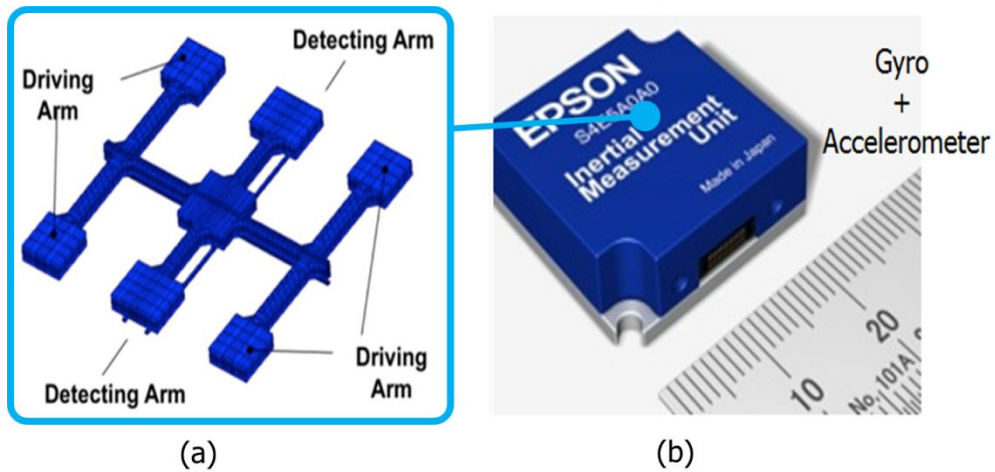


그림 1-2. Epson 사의 6 축 관성 센서 : 결정질 수정으로 만들어진 자이로스코프 구조(a), 실장된 6 축 관성센서(b)

## 1.3 고성능 관성센서의 판단 기준

관성센서의 성능 평가는 여러가지 측면에서 고려되지만, 일반적으로 외부로부터의 입력에 대한 분해능과, 시스템의 바이어스 안정도에 대하여 성능이 평가되고 있다.

### 1.3.1 분해능 (system resolution)

관성 센서의 분해능은 센서의 감지 원리에 따라 계산식이 달라지지만, 일반적으로 설계되는 정전용량의 감지 방식의 경우 전기적 감도와 측정 회로의 잡음 대비 신호 분해능의 관계에 따라 결정된다. 자이로스코프의 경우 식 1-1 에 의하여 자이로스코프의 분해능이 결정된다.

$$\text{System resolution} \left[ \frac{\text{deg/sec}}{\sqrt{\text{Hz}}} \right] = \frac{\text{Circuit Resolution} \left[ \frac{\text{F}}{\sqrt{\text{Hz}}} \right]}{\text{Capacitive Sensitivity} \left[ \frac{\text{F}}{\text{deg/sec}} \right]} \quad (\text{식 1-1})$$

자이로스코프 시스템의 분해능은 측정 회로의 정전 용량 분해능을 자이로스코프의 전기적 감도로 나눈 값으로 계산될 수 있다. 이때, 인쇄 회로 기판(PCB) 수준의 경우 0.1 ~ 수백  $\text{aF}/\sqrt{\text{Hz}}$ , CMOS 수준의 경우 수  $\text{aF}/\sqrt{\text{Hz}}$  의 정전 용량 분해능을 보이는 것으로 알려져 있다. 따라서 전체 시스템의 분해능을 작게 제작하기 위해서는 자이로스코프의 전기적 감도를 크게 해야 한다.

자이로스코프의 전기적 감도는 구동 및 감지 전극의 모양에 따라 다양한 계산식이 유도될 수 있지만, 일반적인 comb 구조를 이용한 정전용량 변화를 이용할 경우, 설계 변수들에 대하여 아래식과 같은 비례



관계가 성립한다.

$$\text{Capacitive Sensitivity} \propto A_s^2 \frac{Q_s}{g_s^2 g_d^2} \frac{Q_d}{k_d} \frac{\Omega_z}{\omega_0} V_d V_c \quad (\text{식 1-2})$$

각 설계 변수에 대한 정의는 다음 표와 같다

표 1-3. 전기적 감도식의 설계 변수

$A_s$	감지부의 변위	$k_d$	구동부의 스프링 상수
$g_s$	감지부 전극 간격	$\Omega_z$	Z 축 각속도
$g_d$	구동부 전극 간격	$\omega_0$	공진 주파수
$Q_s$	감지부의 Q 지수	$V_{dc}$	DC 구동 전압
$Q_d$	구동부의 Q 지수	$V_{ac}$	AC 구동 전압

위의 식에 따라 높은 전기적 감도를 위한 구조물의 설계는 높은 Q 지수와 감지부 변위 향상 그리고, 전극 간격의 최소화 등을 고려해야 한다.

### 1.3.2 바이어스 안정도 (bias stability)

관성 센서의 분해능과 더불어 바이어스 안정도는 관성 센서의 출력에 대한 신뢰성을 나타내는 지수로서, 동일한 입력 각속도에 대한 출력값의 안정도를 수치화하여 나타낸다. 이때, 바이어스 안정도는 관성 센서의

주변 잡음에 의한 출력값의 크기를 통해 계산될 수 있는데, 그 값이 작을수록 안정된 출력값이 형성되므로, 고성능 관성 센서를 설계할 때는 반드시 바이어스 안정도를 최소화 할 수 있도록 해야 한다.

바이어스 안정도에 영향을 미치는 주된 잡음으로서 브라운 잡음을 고려해야 한다. 브라운 잡음이란, 마이크로 수준의 작은 구조물이 수 ~ 수십 nm 의 공진 변위를 가지는 경우, 주변의 공기 분자들과의 충돌에 의한 잡음 변위가 발생하게 된다. 이때 잡음 변위에 의하여, 관성 센서의 출력값의 안정도가 영향을 받게되는 것이다. 일반적으로 자이로스코프의 바이어스 안정도는 아래와 같은 변수들에 의해 비례관계가 성립하는 것으로 알려져 있다.

$$\text{Bias Stability} \propto \frac{1}{D_0} \sqrt{\frac{4k_B T}{Q_s \omega_0 M_s}} \quad (\text{식 1-3})$$

각 설계 변수에 대한 정의는 다음 표와 같다.

표 1-4. 바이어스 안정도의 설계 변수

$D_0$	구동부의 변위	$Q_s$	감지부의 Q 지수
$k_B$	볼츠만 상수	$\omega_0$	공진 주파수
$T$	절대온도	$M_s$	감지부의 질량

앞서 언급했듯이 고성능 관성센서를 제작하기 위해서는 관성센서의 전기적 감도를 최대화하고, 바이어스 안정도를 최소화 할 수 있는 설계 기준이 마련되어야 한다. 이에 따라 위의 관계식에 관여하는 설계 변수들

중에서 구동부 및 감지부의 Q 지수의 향상을 통해 두 조건을 만족시킬 수 있음을 알 수 있다.

## 1.4 높은 Q 지수를 위한 연구 동향

MEMS 관성 센서의 성능을 향상시키기 위하여 고려되는 여러가지 설계 변수 가운데, 높은 Q 지수를 구현하기 위한 다양한 연구가 진행되어 왔다. 일반적으로 Q 지수는 시스템 외부에서 입력된 에너지를 한 공진 주기 동안 소모된 에너지로 나눈 값으로 계산될 수 있다. 이때 소모되는 에너지의 값을 줄일수록 높은 Q 지수를 구현할 수 있게 되는데, 종래에는 주로 고진공 실장을 통해 Q 지수의 향상을 위한 노력이 경주되었다 [8-10]. 하지만, 고진공 실장은 경년 변화에 의해 성능 저하가 예상되어 근본적인 Q 지수의 향상을 구현하기에는 한계가 있을 수밖에 없었다. 이러한 이유로 물질 자체의 높은 Q 지수를 MEMS 구조물에 적용하고자 하는 연구가 진행되어 왔는데, 이러한 물질로서 비정질 수정을 활용하고자 하는 노력이 계속되고 있다.

### 1.4.1 비정질 수정을 활용한 높은 Q 지수의 구현

#### 1.4.1.1 반구형 공진자 각속도계 (Hemispherical Resonator Gyro.)

비정질 수정 물질을 이용한 고성능 자이로스코프의 구현은 MEMS 관성센서의 개념이 정립되기 이전부터 연구가 진행되었다. 최초의 비정질 수정기반 자이로스코프는 기계식 자이로스코프의 단점을 보완하기 위하여 Delco 사에서 개발된 반구형 공진자 각속도계 (hemispherical resonator gyroscope : HRG)의 연구를 통해 구현되었다. HRG의 반구형 구조는 이미 1890년에 영국 과학자 G.H.Bryan에 의해 소개된 바가 있는, ‘wine-glass vibration’ 현상을 자이로스코프에 응용하기 위해 구현되었다. 최초의 HRG는 그림 1-3과 같이 알루미늄을 정밀 가공하여

제작되었다가 높은 Q 지수를 구현하기 위하여 1975 년에 비정질 수정 물질로 제작되었다. 이후 구동 회로의 집적화 및 레이저 가공을 통한 정밀 보정을 통하여,  $10^7$  수준의 Q 지수가 구현되었다. 현재 제작되고 있는 비정질 수정 HRG 는  $2.5 \times 10^7$  수준의 Q 지수를 보이고 있으며, 바이어스 안정도는 약  $8 \times 10^{-6}$  %/hr 로 보고되고 있다 [11].

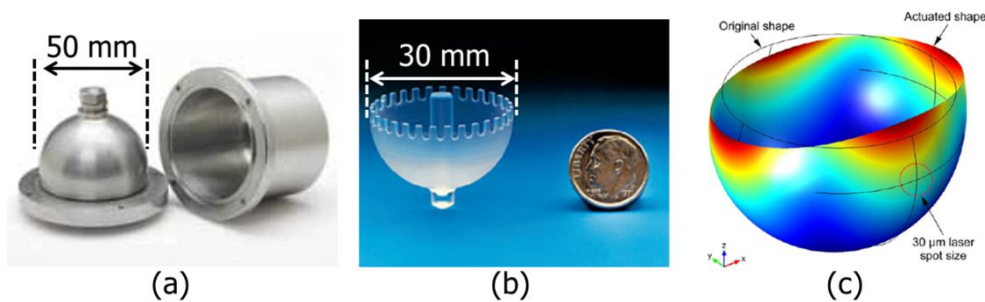


그림 1-3. HRG : (a) 초기 모델, (b) 비정질 수정 모델, (c) wine-glass 모드 공진 시뮬레이션

#### 1.4.1.2 디스크 공진자 각속도계 (Disk Resonator Gyroscope : DRG)

DRG 는 2000 년대 초반 NASA 의 Jet Propulsion Lab.(JPL) 주관 하에 연구되었다. JPL 에서는 HRG 의 성능을 MEMS 수준의 구조물에서 구현하기 위하여 비정질 수정에 대한 공정 연구가 진행되었는데, 이러한 결과로서, 습식 식각을 통한 bulk-micro-machining 이 아닌, 건식 식각 (DRIE)을 이용한 미세가공, 수정 웨이퍼의 eutectic 접합, 고진공 실장에 대한 공정 방법이 구현되었다. 이를 이용하여, 2008 년 DRG 가 개발되었으며, 웨이퍼 레벨로 구현된 비정질 수정 기반 MEMS 각속도계의 효시로 볼 수 있다. DRG 의 Q 지수는 약  $8 \times 10^5$  수준으로

측정되었으며, 바이어스 안정도는 약  $1 \times 10^{-3} \text{ } \%/hr$  로 보고되고 있다 [12]. DRG 의 특징으로는 기존의 공진형 링 각속도계 (Vibrating Ring Gyro. : VRG) 의 디자인에서 구동 및 감지의 효율을 높이기 위해 여러 개의 링을 연결하였으며, 링 사이에 감지 및 구동 전극을 배치하여 feed-through noise 를 줄일 수 있었다.

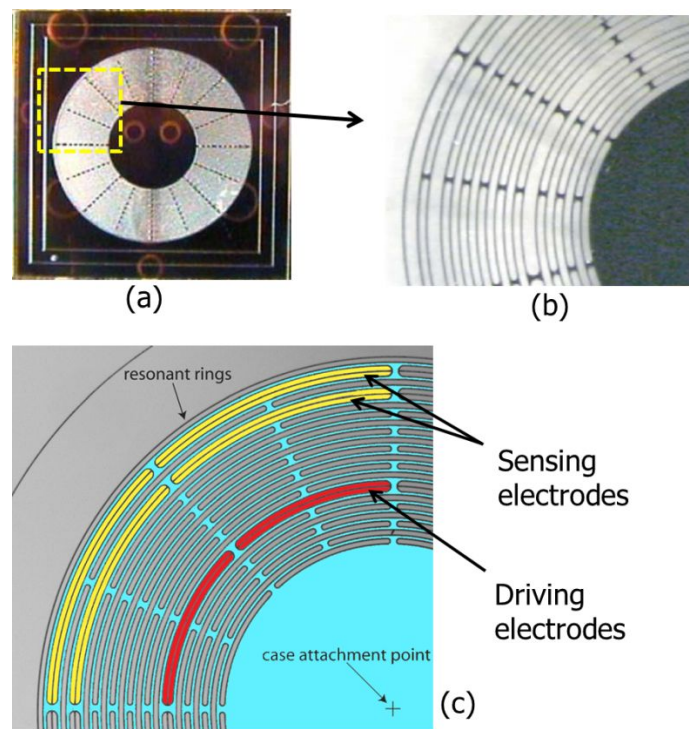


그림 1-4. DRG : (a) 비정질 수정으로 제작된 DRG 공진자, (b) DRG 의 구조물, (c) 구동 및 감지 전극 패턴

#### 1.4.1.3 Bird-bath 공진자 각속도계 (Bird-Bath Resonator Gyro : BRG)

Michigan 대학의 K.Najafi 연구 그룹에 의하여 개발된 BRG 는 비정질 수정 기반의 wine-glass 형태의 3-D 구조물을 MEMS 공정을

활용하여 구현한 각속도계로서 가장 최근에 보고 되었다 [13]. J.Cho. et al.은 높은 Q 지수의 비정질 수정 구조물을 제작하기 위하여 기존의 표면 미세 가공 방법이 아닌 blow-torch-molding 을 통해 HRG 구조물에 가깝게 공진자를 구현하였다 [14]. BRG 의 크기는 반지름 2.5 mm, 높이 1.55 mm 로 보고되고 있으며, 측정된 Q 지수는 약  $2.5 \times 10^5$  수준으로서 기존의 in-plane 구동 각속도계와 비교하여 약 5 ~ 10 배의 향상된 Q 지수를 구현하였다. 바이어스 안정도는 약 1 %/hr 수준으로 보고되었다.

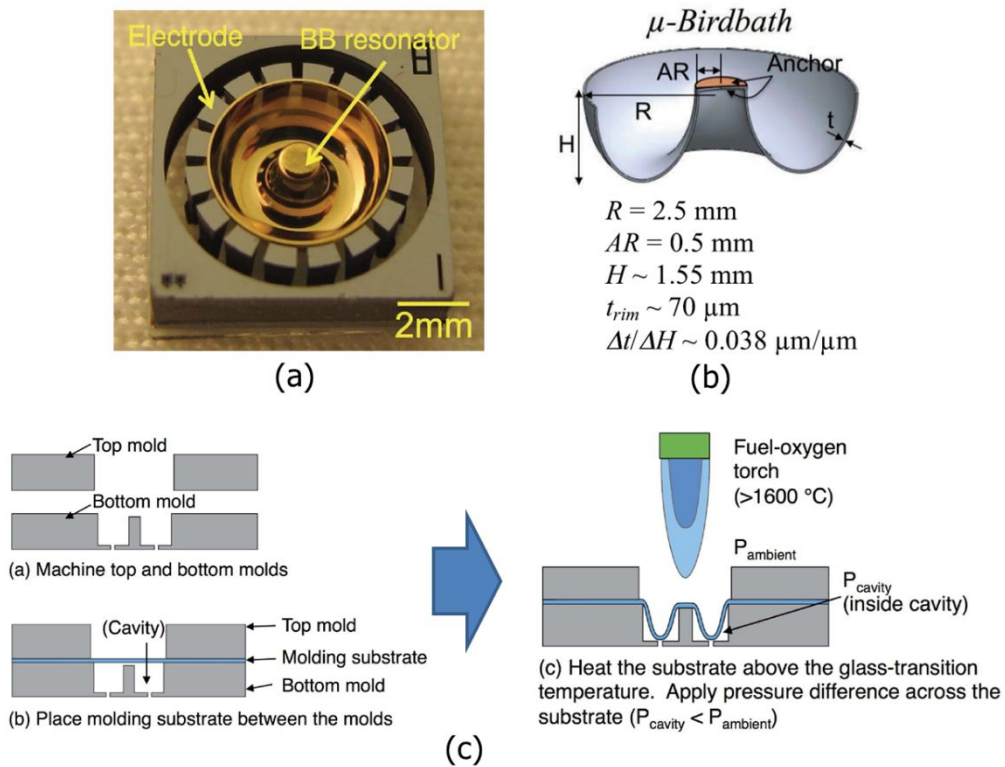


그림 1-5. BRG : (a) 비정질 수정으로 제작된 BRG, (b) BRG 단면도 및 치수, (c) blow-torch molding 공정도

## 1.5 연구의 동기

MEMS 공정을 이용한 초소형 관성센서는 1980년대 이후 지금까지 연구되어 오면서 다양한 분야의 수요를 충족시키기 위하여 성능이 향상되었다. 특히 2000년대 중반 이후 모바일 기기 및 로봇 청소기와 같이 모션 센싱을 필요로 하는 가전 제품의 등장은 MEMS 관성 센서의 시장 확대에 큰 역할을 하였다. 이러한 시장의 수요에 맞추어 MEMS 관성센서는 CMOS와의 호환성 및 공정상의 효율성을 위하여 주로 실리콘 웨이퍼 기반의 관성 센서가 제작되었다. 이러한 실리콘 기반의 MEMS 관성 센서는 현재 성능의 향상 보다는 생산 단가의 절감 및 센서의 집적화를 위하여, 6축 혹은 9축 combo 센서로 통합하려는 연구가 많이 진행되고 있다. 하지만 향후 MEMS 관성 센서의 시장은 지금의 단순한 회전 및 기울임에 대한 정보의 제공에서 더 나아가 속내 항법이나 도보 항법과 같은 고성능 관성 센서를 통한 고급 정보의 창출을 요구하고 있다.

고성능 관성 센서는 높은 전기적 감도와 낮은 바이어스 안정도의 두 요건을 만족시켜야 하는데, 이는 디바이스의 높은 Q 지수를 통해 구현할 수 있다. 이러한 높은 Q 지수의 관성 센서를 개발하기 위해 다양한 시도들이 연구되고 있는데, 단결정 실리콘 보다 열안정성이 우수한 수정 물질을 활용하는 방안이 연구되고 있다.

일반적으로 수정물질은 단결정 실리콘과 비교하여 열 안정성이 우수한 물질로 문헌상 보고되어 있으며, 특히 비정질 수정은 단결정 실리콘에 비해 약 1/5 배의 열팽창 계수, 그리고 1/100 배의 열전달 계수 특성을 보이고 있어, 공진 시 구조물 자체에서 발생하는 에너지의 손실을 줄일 수 있을 것으로 여겨지고 있다.



그러나 지금까지 주로 연구되고 상용화된 수정기반의 관성 센서는 대부분 단결정 수정을 이용한 압전성을 이용하여 동작하기 때문에, 결정 방향성을 고려한 디자인이 필수적이다. 이러한 결정 방향성의 한계는 구조물 설계의 자유도를 떨어뜨리는 걸림돌로 작용하고 있다.

또한 결정질 수정 기반의 관성 센서는 대부분 결정 방향에 따른 습식 식각으로 제작되며 소자의 개별 실장을 통해 생산이 이루어지고 있어 웨이퍼 단위 공정을 통한 대량 생산 및 제작 단가의 절감이 어려운 실정이다. 또한  $\text{SiO}_2$  기반의 물질을 사용하고 있으므로, 실리콘 기반의 MEMS 소자에 비하여 CMOS 와의 호환성이 떨어지는 단점을 보이고 있다.

비정질 수정을 활용할 경우, 앞서 언급했듯이 높은 Q 지수의 구조물 구현이 가능할 것으로 여겨지고 있으며, 웨이퍼 단위의 건식 식각 공정을 통하여, 결정질 수정의 제작 공정상의 단점을 극복 할 수 있을 것으로 여겨지고 있다. 또한 웨이퍼 단위의 접합 공정을 확립할 경우, 실리콘 웨이퍼가 갖는 CMOS 와의 호환성을 살릴수 있는 장점이 있다.

미국(Honeywell)과 일본(Murata, Epson yotocom)등의 선진국들은 고성능 관성 센서의 선도유지를 위하여, 결정질 수정 혹은 비정질 수정 기반의 고성능 자이로스코프에 대한 연구를 활발히 진행 중에 있으며, 1990 년대부터 축적된 공정 노하우를 바탕으로 다양한 형태의 자이로스코프를 제작하고 시장에 공급하고 있다. 하지만 국내의 경우, 비정질 수정 뿐 아니라 결정질 수정을 이용한 관성 센서의 제작에 관한 연구조차 거의 보고되어 있지 않고 있어 이에 대한 연구의 필요성이 더욱 요구되고 있다.

본 논문에서는 비정질 수정 기반의 고성능 관성센서의 개발 가능성을 타진하기 위하여, 높은 Q 지수를 갖는 비정질 수정 양팔보 소리굽쇠(double-ended tuning fork : DETF) 공진자를 구현하였다.

DETF 공진자의 구조는 MEMS 관성 센서에서 공진 시 에너지 손실이 주로 발생하는 스프링과 지지부의 구조만으로 구성되어 있어, 설계가 간단하면서도, 에너지 손실 요인의 분석이 용이한 구조적 특징을 갖고 있다. 또한 양팔이 대칭으로 공진하는 tuning fork 모드에서 지지부에 인가되는 응력을 상쇄할 수 있어 지지부 감쇠에 의한 에너지 손실 요인을 최소화 할 수 있는 구조이다.

DETF 공진자의 높은 Q 지수를 구현하기 위하여, MEMS 구조물의 Q 지수에 관여하는 에너지 손실 요인들을 분석하고, 비정질 수정 물질이 갖는 열탄성 감쇠 및 지지부 감쇠 특성을 반영한 Q 지수 곡선을 도출함으로써, 이를 반영한 Q 지수 설계 가이드를 제안하였다.

비정질 수정 구조물의 제작에 있어서, 기존의 결정질 수정 기반의 제작 공정에 활용되었던 습식 식각의 단점을 극복하고자, 비정질 수정 웨이퍼의 건식 식각 공정을 확립하였다.

그리고, DETF 공진자 내부의 잔류 응력을 최소화 하기 위하여, 수정-수정 웨이퍼 직접 접합 공정을 마련하여, 공진자 구조물 및 지지기판이 모두 비정질 수정으로 이루어진 DETF 구조물을 제작하였다.

본 논문을 통해 연구된 건식 식각 및 수정 웨이퍼의 직접 접합 공정은 수정 물질의 높은 Q 지수 특성을 반영하면서도, 웨이퍼 단위 생산 및 실장 그리고, IC 혹은 CMOS 와의 호환성을 높일 수 있을 것으로 사료된다.

## 1.6 연구의 목적

본 논문에서는 기존의 MEMS 관성 센서의 성능 향상을 위하여, 비정질 수정의 열 안정성을 활용한 높은 Q 지수 공진자를 구현하고자 한다. 이를 위하여, 양팔보 구조물에서의 Q 지수에 관여하는 에너지 손실 요소를 분석하고, 비정질 수정 물질과 단결정 실리콘 물질의 이론적인 Q 지수 특성을 도출하여, 비정질 수정 구조물의 높은 Q 지수 설계 가이드라인을 제안하는 것을 일차 목표로 한다.

제안된 Q 지수 설계 방법을 통하여, 비정질 수정 DETF 공진자의 Q 지수를 최적화하여 설계에 반영한다.

설계된 비정질 수정 DETF 공진자의 제작을 위하여, 기존의 결정질 수정 구조물 제작에 이용되던 습식 식각의 단점을 극복하고, 웨이퍼 단위의 건식 식각 공정을 확립한다.

공진자의 내부의 잔류 응력을 최소화 하기 위하여, 공진자 구조물과 지지기판이 모두 비정질 수정으로 이루어진 구조물을 제작할 수 있도록, 수정-수정 웨이퍼 직접 접합 공정을 마련한다.

구동 회로를 통하여 비정질 수정 DETF 의 정전 구동을 실시하고, 자가 공진 및 free-ring down test 를 통하여 Q 지수를 측정하고, 같은 크기의 단결정 실리콘 DETF 와의 Q 지수를 비교하여, 제안된 설계 및 제작 공정의 효용성을 실험적으로 입증하는 것을 최종 목표로 한다.

## 1.7 논문의 구성

본 논문의 2 장에서는 Q 지수의 개념을 알아보고, 양팔보 MEMS 공진자의 Q 지수에 관여하는 에너지 손실 요소를 분석하였다. 또한 비정질 수정 및 단결정 실리콘의 Q 지수 특성을 비교하여, 높은 Q 지수를 갖는 비정질 수정 기반 공진자의 설계 가이드라인을 도출하였다.

3 장에서는 비정질 수정 구조물의 잔류 응력을 최소화하기 위한 수정-수정 웨이퍼 직접 접합 공정에 대한 서술과 함께, 접합 웨이퍼의 잔류 응력 실험,  $O_2$  플라즈마 처리에 따른 표면에너지 측정과 접합력 실험, 그리고, 접합 공정의 재연성에 대한 실험을 정리하였다.

4 장에서는 접합된 수정 웨이퍼의 이방성 건식 식각 공정에 관한 단위 실험 및 결과, 도출된 문제점 및 해결 방안들을 제안하였다.

5 장과 6 장에서는 제안된 Q 지수 설계 방법 및 제작 공정을 활용하여 높은 Q 지수를 갖는 비정질 수정 DETF 공진자를 제작하고, 회로 구동을 통한 자가 발진 및 ring-down test 를 통한 Q 지수의 측정을 정리하였다. 또한 같은 크기의 단결정 실리콘 DETF 공진자와의 Q 지수 비교를 통하여, 비정질 수정 기반 공진자의 높은 Q 지수를 실험적으로 입증하였다.

7 장에서는 본 논문에서 제안한 비정질 수정 공진자의 성능을 종합적으로 평가하며, 결론을 맺는다.

## 제 2 장 Q-지수 분석

### 2.1 Q-지수의 개념

Q-지수의 개념은 아래와 같은 Damped-vibration 모델의 공진 특성을 설명하기 위하여 도입되었다.

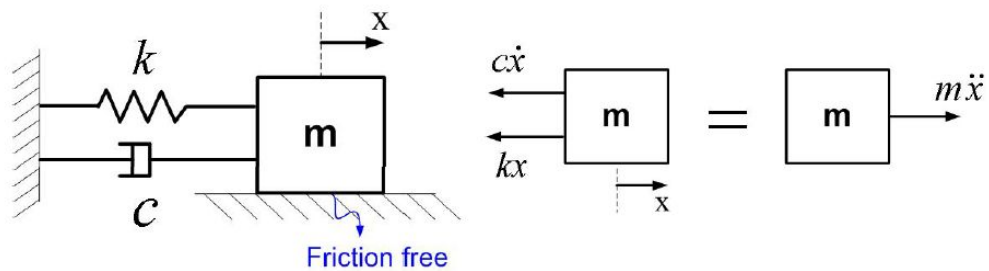


그림 2-1. Damped-vibration 모델

위와 같은 spring-mass 시스템을 가정할 때, 외부로부터의 에너지는 스프링의 위치에너지와 댐퍼의 에너지 손실의 합으로 정의된다. 이때, 그림의 오른쪽과 같은 힘의 평형조건을 이용하면 아래 식 (2-1)과 같은 전달함수를 유도할 수 있다.

$$H(S) = \frac{X(S)}{F(S)} = \frac{\frac{1}{m}}{S^2 + \frac{c}{m}S + \frac{k}{m}} \quad (\text{식 2-1})$$

위의 전달함수에 의하여 스프링 질량 시스템이 공진 주파수  $\omega_0$  로

진동한다고 가정할 때, 분자항에 위치한 2차 식에서, 댐핑에 의한 1차항의 계수와 상수항을 아래 식(2-2)과 같이 각각 정의 할 수 있다.

$$\frac{k}{m} = \omega_0^2, \quad \frac{c}{m} = 2\xi\omega_0 \quad (\text{식 2-2})$$

이를 다시 전달함수에 대입하면,

$$H(S) = \frac{\frac{1}{k}\omega_0^2}{S^2 + 2\xi\omega_0 S + \omega_0^2} \quad (\text{식 2-3})$$

이때,  $2\xi\omega_0$  를 공진주파수  $\omega_0$  보다 매우 작은 weak damping 시스템을 가정하면,  $2\xi\omega_0$  는 공진시 에너지가 1/2가 되는 점들의 폭, 즉 3dB band-width ( $\omega_{3dB}$ )가 된다.

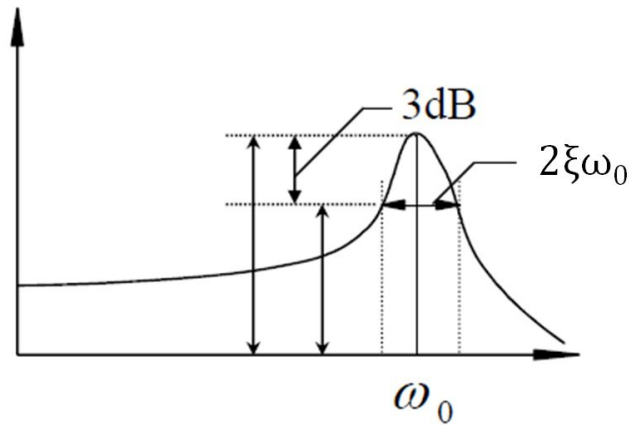


그림 2-2. 주파수 응답 곡선과 3 dB band-width

이때, Q 지수의 개념을 식 (2-4)와 같이 도입하면,

$$Q = \frac{1}{2\xi} = \frac{\omega_0}{\omega_{3dB}} = \frac{f_0}{f_{3dB}} = 2\pi \frac{E}{\Delta E} \quad (\text{식 2-4})$$

여기서  $E$ 는 공진 시스템에 저장된 전체 에너지를 말하며,  $\Delta E$ 는 한 주기 동안 공진할 때, 발생하는 에너지의 손실을 의미한다. 즉,  $Q$  지수는 공진 시스템에서 손실된 에너지량의 역수와 비례하며, 전체 시스템의  $Q$ 지수는 각각의 에너지 손실 요인에 의한  $Q$ 의 역수의 합으로 표현된다.

$$\frac{1}{Q_{\text{total}}} = \frac{1}{Q_A} + \frac{1}{Q_B} + \frac{1}{Q_C} + \frac{1}{Q_D} + \dots \quad (\text{식 2-5})$$

## 2.2 에너지 손실 요인

앞서 진술한 바와 같이  $Q$  지수는 전체 에너지 손실의 역수에 비례한다. 이 때, 마이크로 구조물 레벨의 공진 시스템에서 고려되는 에너지 손실의 주된 요인은 다음과 같이 4 가지 요소로 분류된다고 보고되고 있다 [15].

$$\frac{1}{Q_{\text{total}}} = \frac{1}{Q_{\text{air}}} + \frac{1}{Q_{\text{TED}}} + \frac{1}{Q_{\text{support}}} + \frac{1}{Q_{\text{surface}}} + \dots \quad (\text{식 2-6})$$

이는 각각 공기 감쇠(air damping), 열탄성 감쇠(thermoelastic damping), 지지부 감쇠(support damping), 표면 감쇠(surface damping)를 의미한다.

이 중, 표면 감쇠에 의한 에너지 손실은 제작 과정에서 발행하는 구조물의 표면에 크랙 혹은, 먼지 혹은 기타 오염 물질에 의해 발생하는 것을 의미한다. 일반적으로 sub-micro 이하의 레벨에서 제작되는 공진자의 구조물의 경우 부피대비 표면적의 효과를 무시할 수 없기 표면 감쇠는 주된 에너지 손실 요인으로 작용할 수 있다고 알려져 있다 [16, 17]. 하지만 본 논문에서 제작하고 있는 공진자의 경우 sub-micro 레벨의 공진자가 아니므로  $Q$  지수의 영향 요인에서 제외하였다.

공기 감쇠에 의한 에너지 손실은 대기압 혹은 낮은 레벨의 진공 분위기에서 공기 분자들의 충돌에 의하여 손실된 에너지를 말한다. 따라서 공기 감쇠에 의한  $Q$  지수는 압력에 대하여 큰 영향을 받을 수 밖에 없는데, Newell et al. 은 압력과  $Q$  지수의 관계를 규명하기 위하여 압력을 다음과 같은 3 개의 영역으로 분류하였다 [18].



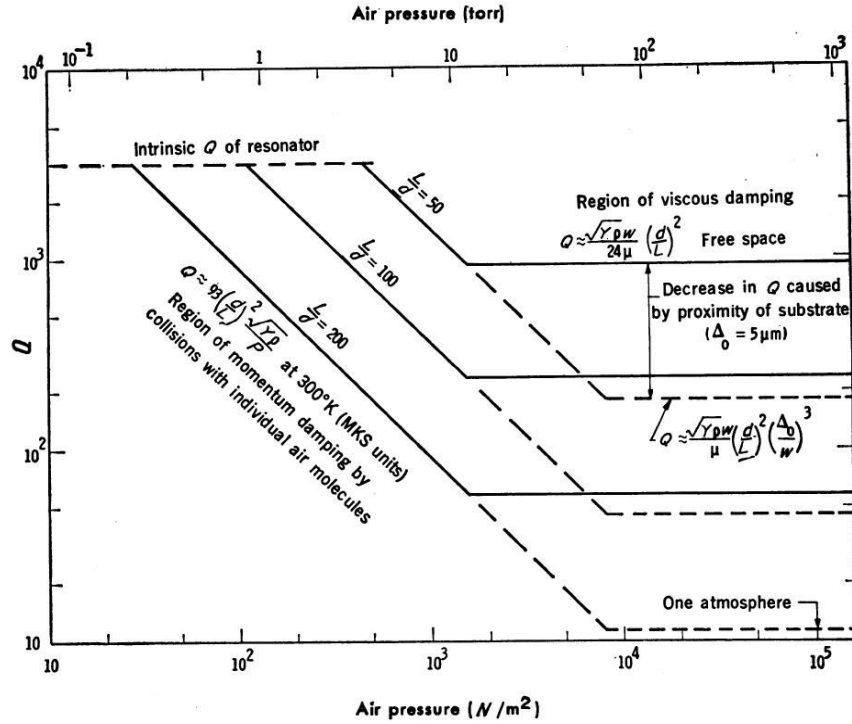


그림 2-3. 압력에 따른 공기 감쇠에 의한 Q 지수의 변화

첫번째 영역은  $10^{-1}$  Torr 이하의 고진공 영역이며, 마이크로 구조물이 공기 분자에 의한 저항을 거의 받지 않는 영역으로 볼 수 있다. 따라서 공진자의 내부 마찰(intrinsic friction)에 의하여 Q 지수가 주로 영향을 받게 된다. 둘째 영역은 공기의 분자에 의한 모멘텀이 공진자의 구동부분에 전달되는 영역으로 정의하고 있다. 논문상의 보고에 의하면, 약 1~10 Torr 영역이 이에 해당하며, 구조물의 크기에 의해 Q 지수가 영향을 받게 된다. 세번째 영역은 수십 Torr 에서 대기압까지를 말하는 영역으로서 공기에 의한 viscous 댐핑이 Q 지수에 영향을 주는 영역이다.

Yasumura et al. 은 Sub-micro 두께의 얇은 외팔보를 제작하고 이에 영향을 미치는 에너지 손실 요인들을 분석하였는데, 공기의 저항의 경우,

$10^{-3}$  Torr 이하의 진공도에서 Q 지수에 큰 변화가 없음을 실험적으로 보고하고 있다 [19]. 이외의 다양한 문헌상의 보고를 확인해 볼 때, 실험적으로  $10^{-3} \sim 10^{-4}$  Torr 이하의 진공 분위기에서는 공기 분자에 의한 에너지 손실이 거의 발생하지 않음을 확인할 수 있다 [20-22].

이상의 경우를 고려한다면, 마이크로 레벨의 구조물이 고진공 분위기에서 구동된다면, 고려의 대상으로 삼아야하는 에너지 손실의 요인은 크게 열탄성 댐핑 과 지지부 댐핑으로 압축 될 수 있다.

### 2.2.1 열탄성 감쇠에 의한 에너지 손실

열탄성 감쇠(thermo-elastic damping)는 공진자의 구조물에서 스프링과 같이 변형이 발생하는 부분에서 반드시 발생하는 요인이다. 그림 2-4와 같이 구조물에서 물리적인 변형이 발생할때, 횡압력을 받는 면에서는 주변보다 공기의 온도가 올라가게 된다. 이와 동시에 반대쪽 면에서는 인장력이 발생하므로 주변보다 온도가 내려가게 된다. 이 때, 온도가 높은 면에서 온도가 낮은 면의 방향으로 온도 구배(thermal gradient)가 형성되는데, 이러한 온도의 불균형은 열전달을 통해 평형상태가 된다. 이러한 열전달에 의해 소진되는 에너지를 열탄성 에너지 손실이라고 규정한다 [23].

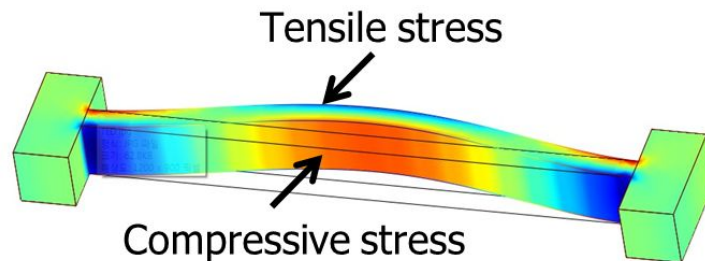


그림 2-4. 열탄성 감쇠 (양팔보 구조물)

Zener et al.은 열탄성 감쇠에 의한 에너지 손실을 식 (2-7)과 같이 분석하여 일반화 하였다. 이른바 ‘Zener’ s equation’ 으로 명명된 아래의 수식은 여러가지 형태의 구조물에서 열탄성 감쇠의 에너지 손실을 분석하기 위한 바탕식이 되고 있다.

$$Q_{TED} = \frac{\rho C_p}{\alpha^2 T E} \frac{f_R^2 + f_T^2}{f_R f_T} \quad (\text{식 2-7})$$

여기서  $f_R$  과  $f_T$  는 각각 공진 주파수와 열평형 주파수(isothermal frequency)를 의미하며, 앞 부분의 계수는 각각 밀도( $\rho$ ) , 열용량( $C_p$ ) , 선팽창 계수( $\alpha$ ) , young' modulus( $E$ ) , 절대온도( $T$ )를 의미한다.

이때, 계수 부분을 제외하고, 공진주파수와 열평형 주파수만으로 이루어진 함수를 고려하면, 식 2-8과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$Q(f_R, f_T) = \frac{f_R^2 + f_T^2}{f_R f_T} = \frac{f_R}{f_T} + \frac{f_T}{f_R} \quad (\text{식 2-8})$$

즉, 함수  $Q(f_R, f_T)$ 는 상대 주파수값( $f_R/f_T$ )에 대하여, 그림 2-5와 같은 그래프로 나타낼 수 있다.

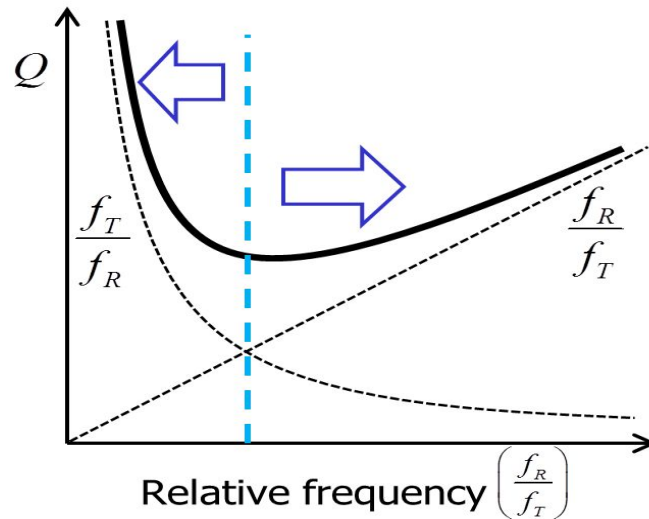


그림 2-5. 상대주파수 값에 따른 Q 함수의 곡선 변화

위의 그래프에서 함수 Q 는  $f_R \gg f_T$ , 혹은  $f_R \ll f_T$  의 조건에서 값이 점점 커지게 된다. 즉, 공진주파수와 열평형 주파수의 이격이 클수록, 열탄성에 의한 에너지 손실이 줄어들게 된다. 따라서 공진자의 스프링을 설계할 때, 열탄성 감쇠의 효과를 줄이기 위해서는 공진 주파수와 열평형 주파수의 이격이 최대한 커질 수 있도록 설계를 해야 한다. 이 같은 조건의 정성적인 의미를 생각해보면,  $f_R \gg f_T$  일 때는 공진자의 공진이 너무 빨라서, 열평형에 의한 에너지 손실이 발생하지 않는 것을 말하고, 반대로,  $f_R \ll f_T$  일 때는 공진자의 공진이 너무 느려서, 열의 불균형이 발생하지 않아 에너지 손실이 발생하지 않는 조건임을 알 수 있다.

또한  $f_R = f_T$  일 때는 공진 주파수와 열평형 주파수가 같은 조건이므로, 공진 주파수에 맞추어, 온도 구배의 변화가 최대로 발생하는 경우이므로, 열평형에 의한 에너지 손실이 제일 큰 조건임을 알 수 있다.

#### 2.2.1.1 비정질 수정 물질과 실리콘 물질의 열탄성 감쇠 특성

위의 Zener eq.의 함수는 열평형 주파수  $f_T$  와 공진 주파수  $f_R$  에 의하여 값이 결정되는데, 이때,  $f_T$  와  $f_R$  의 함수는 양팔보의 구조물에 대해서 각각 식 2-9, 식 2-10과 같이 쓸 수 있다.

$$f_R = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{16E}{0.3714 \cdot \rho}} \frac{w}{L^2} \quad (\text{식 2-9})$$

$$f_T = \frac{\pi}{2} \frac{k_{th}}{\rho C_p w^2} \quad (\text{식 2-10})$$

따라서, 공진 주파수의 함수는 양팔보의 길이  $L$ 이 고정될 경우, 양팔보의 폭( $w$ )의 함수로 규정할수 있으며, 열평형 주파수와 함께, 양팔보의 폭( $w$ )에 대하여 같이 표현할 수 있게 된다.

이와 더불어, Zener' eq. 물질 상수에 의한 계수 부분의 값은 각각 비정질 수정과 단결정 실리콘의 물질 상수값을 통해 계산할 수 있는데, 각각의 물질 상수들을 정리하면 표 2-1 과 같다.

표 2-1. Zener' eq.의 물질 상수값 [24].

	Unit	Fused quartz	Silicon
$\rho$ (Density)	$[\text{kg}/\text{m}^3]$	2203	2330
$C_p$ (Heat capacitance)	$[\text{N} \cdot \text{m}/\text{kg} \cdot \text{K}]$	750	700
$\alpha$ (Expansion coefficient)	$[1/\text{K}]$	$0.6 \times 10^{-6}$	$2.6 \times 10^{-6}$
$E$ (Young's modulus)	$[\text{N}/\text{m}^2]$	$72 \times 10^9$	$170 \times 10^9$
$T$ (Temp.)	$[\text{K}]$	300	300
$k_{th}$ (Thermal conductivity)	$[\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}]$	1.3	130

위의 물질 상수값을 반영하여, 양팔보의 폭에 대한 비정질 수정과 단결정 실리콘 양팔보의 열탄성 감쇠 특성 곡선을 도시하면, 그림 2-6과 같다.

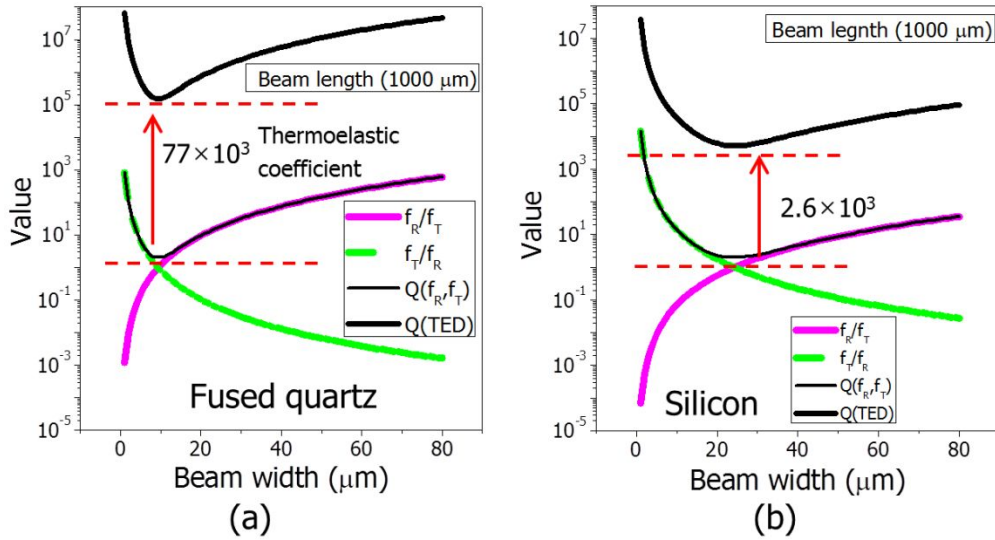


그림 2-6. 열탄성 감쇠에 의한 Q 곡선(  $L = 1000 \mu m$  ) :

(a) 비정질 수정 양팔보 공진자, (b) 단결정 실리콘 양팔보 공진자

각 물질의 열탄성 감쇠 특성 곡선을 살펴보면 위에서 계산된 상대주파수값( $f_R/f_T$ )에 의한 Q 함수의 값이 물질 상수에 의해 결정된 계수만큼 곱하여 형성됨을 확인할 수 있으며 이때의 계수는 비정질 수정의 경우 단결정 실리콘 보다 약 30 배 가량 높은 값을 가짐을 볼 수있다. 또한 표 2-1에서 볼 수 있듯이 비정질 수정 물질은 단결정 실리콘보다 약 1/100 배의 작은 열전도도를 갖고 있으므로, 식 2-10 에서와 같이 열평형 주파수( $f_T$ )의 값이 낮아지는 효과를 기대할 수 있게 된다. 낮은 열평형 주파수는 열평형에 이르는 시간이 길어짐을 의미하며 그만큼 온도 구배의 변화에 의한 열 에너지의 손실이 줄어들음을 뜻한다. 따라서 비정질 수정 공진자는 단결정 실리콘 공진자보다 적은 열 에너지 손실을 기대할 수 있는 장점이 있다.

단결정 실리콘 공진자보다 열 에너지 손실이 적게 발생하는 비정질 수정 공진자의 특성은 그림 2-6-a와 2-6-b와 같이 두 물질에 대하여

산출된 열탄성 감쇠 Q 곡선의 양상을 비교하여 확인할 수 있다. 비정질 수정 공진자의 경우, 양팔보의 폭( $w$ )에 대하여 열탄성 감쇠 Q 지수가 공진주파수와 열평형 주파수가 같아지는 최소점 이후 다시 가파르게 상승하는 양상을 볼 수 있다. 단결정 실리콘 공진자의 경우도, 최소점 이후의 Q 지수가 상승하고 있지만, 비정질 수정 공진자와 비교하여 그 기울기가 작은 모습을 확인할 수 있다.

즉, 단결정 실리콘과 비정질 수정 공진자 모두, 열평형 주파수와 공진 주파수가 같아지는 점에서는 가장 큰 열탄성 감쇠가 발생하므로, 열평형 주파수와 이격이 큰 낮은 주파수 혹은 높은 주파수 대역에서 공진 주파수를 설계해야 한다. 이 때, 비정질 수정 공진자의 경우 높은 공진주파수에 대해 단결정 실리콘 공진자보다 높은 열탄성 감쇠 Q 지수를 구현할 수 있는 것이다.

한편, 양팔보의 길이 변화에 대하여 비정질 수정 및 단결정 실리콘 양팔보에 대한 열탄성 감쇠 그래프를 그려보면 그림 2-7과 같다. 양팔보의 길이에 따른 열탄성 감쇠 그래프를 보면, 비정질 수정과 단결정 실리콘 모두, 물질 상수에 의해 결정되는 최저값은 변하지 않지만, 길이가 증가함에 따라 그래프가 오른쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 이는 식 2-9와 같은 양팔보의 공진주파수 계산식에서 양팔보의 길이( $L$ )가 증가함에 따라 동일한 양팔보의 폭( $w$ )에 대하여 공진주파수( $f_R$ )가 낮아지게 될 때, 상대 주파수값( $f_R/f_T$ )은 값이 작아지게 되고, 그 역수값( $f_T/f_R$ )은 커지게 되어 나타나는 현상이다. 즉, 그림 2-6에서 상대주파수와 역수의 교차점으로 표현되는 최저 Q 지수 포인트가 그래프의 오른쪽으로 움직이게 되는 효과를 볼 수 있는 것이다. 이러한 양팔보의 길이( $L$ )변화에 따른 Q 지수 곡선의 천이 특성은 후에 설명할 비정질 수정 공진자의 설계 공진주파수에 대하여 Q 지수를 최적화 할 수 있는 구조물의 치수 설계가 가능하게 되는 원인으로



작용하게 된다.

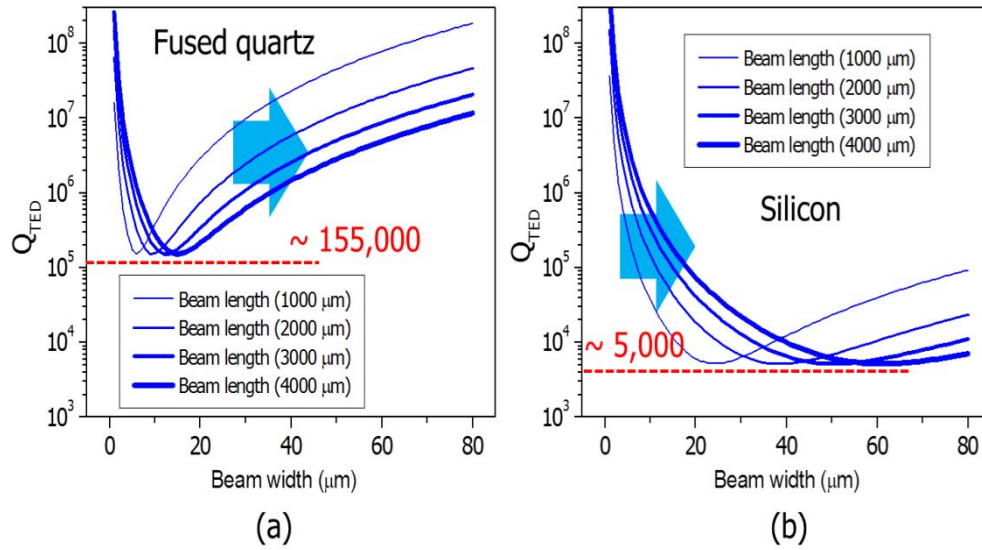


그림 2-7. 양파보의 길이( $L$ )의 변화에 따른 열탄성 감쇠  $Q$  곡선의 변화 : (a) 비정질 수정, (b) 단결정 실리콘

## 2.2.2 지지부 감쇠에 의한 에너지 손실

지지부 감쇠에 의한 에너지 손실(support damping loss, anchor loss)은 열탄성 감쇠에 의한 에너지 손실과 더불어 공진을 통해 물리적 변형이 일어나는 구조물에서 반드시 발생하게 되는 내부적 손실 요인이다. 지지부 감쇠에 의한 에너지 손실을 규명하기 위하여, 많은 연구들이 진행되어 왔는데, 일반적으로 다음과 같은 과정을 통해 일어난다고 보고되고 있다 [16, 19, 23, 24].

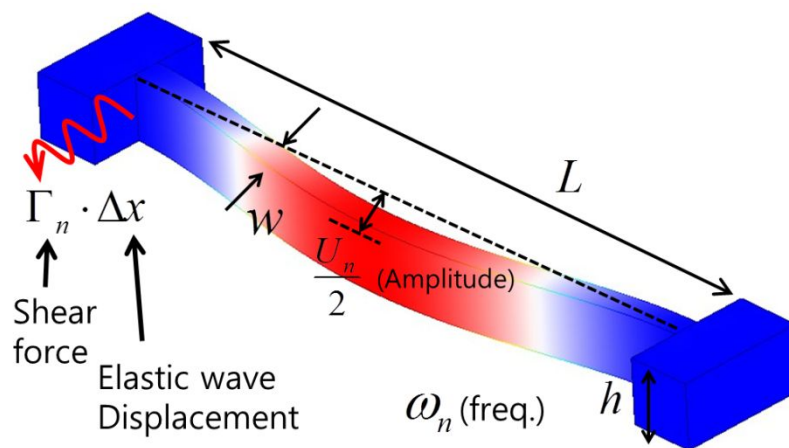


그림 2-8. 지지부 감쇠의 모식도

외부로부터 공진자에 인가된 진동 에너지가 구조물의 빔(beam)의 진동으로 나타나게 되고, 빔과 구조물의 support 부분에서 전단응력(shear force)과 탄성파에 의한 변위를 야기하게 된다. 이 때 생기는 전단응력과 탄성파의 변위의 곱이 지지부분에서 손실되는 에너지 요소로 작용한다.

Zhili Hao et al.은 앞서 전술한 Q 지수의 정의로부터, 즉 지지부에서

야기되는 공진 주파수를 기준으로 1주기 동안의 손실되는 에너지의 크기를 외팔보(cantilever beam)와 양팔보(bridge beam)의 구조물에 대하여 다음과 같은 수식으로 표현하고 이의 타당성을 실험적으로 보고한 바 있다 [25]. 위의 그림과 같은 양팔보 구조물에서 지지부 에너지 손실에 의한 Q 지수는 다음과 식 2-11로 표현할 수 있다.

$$Q_{\text{support}} = 2\pi \frac{\text{overall energy}}{\text{energy-loss per 1 vibration}} = 2\pi \frac{W}{\Delta W} \quad (\text{식 2-11})$$

이때, 양팔보 진동 시의 내부 에너지는 식 2-12와 같이 유도 할 수 있다.

$$W = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{8}\rho SL\omega_n^2 U_n^2 \quad (\text{식 2-12})$$

한편, 한 공진 주기 동안 지지부에서 소모되는 에너지 손실량은 식 2-13과 같이 인가되는 전단 응력과 양팔보 끝단의 탄성파에 의한 변위의 곱으로 계산된다.

$$\Delta W = \Delta x \cdot \Gamma_n \quad (\text{식 2-13})$$

이때 전단 응력과 변위는 각각 식 2-14, 식 2-15와 같이 계산되므로,

$$\Gamma_n = EI U_n \cdot \left( \frac{1.5\pi}{L} \right)^3 \quad (\text{식 2-14})$$

$$\Delta x = \frac{w}{16E \cdot h} (3 - \nu)(1 + \nu) \Gamma_n \quad (\text{식 2-15})$$

양팔보 구조의 지지부 감쇠에 의한 Q 지수는 식 2-16과 같이 양팔보의 크기에 대한 함수로 표현 가능하다.

$$Q_{\text{support}} = \frac{2.16}{(3 - \nu)(1 + \nu)} \left( \frac{L}{w} \right)^3 \quad (\nu : \text{Poison ratio}) \quad (\text{식 2-16})$$

위의 Q 지수 방정식은 고정된 양팔보의 길이  $L$ 에 대하여 양팔보의 폭  $w$ 에 관한 함수로 볼 수 있다. 이때, 길이  $L$ 의 변화에 따른 Q 지수값의 변화 양상을 그림 2-9와 같은 그래프로 나타낼 수 있다.

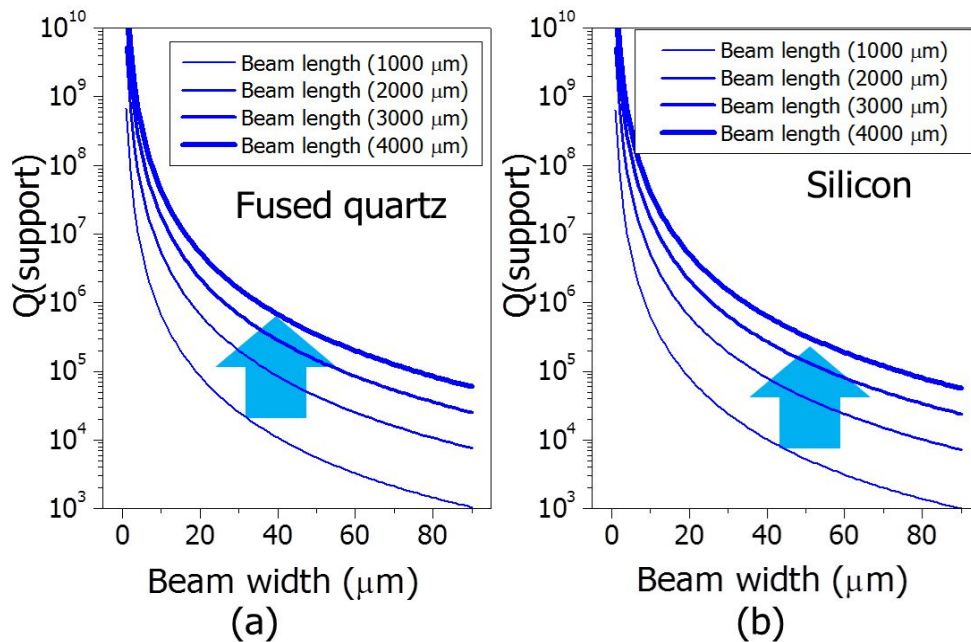


그림 2-9. 길이 변화에 따른 지지부 감쇠 Q 곡선의 변화 : (a) 비정질 수정, (b) 단결정 실리콘

그림 2-9의 그래프를 살펴보면, 같은 길이에 대해서 양팔보의 폭이 증가할수록  $Q$  값이 작아지고, 길이가 증가할수록 같은 양팔보의 폭에 대하여 그 값이 커지는 양상을 확인할 수 있다. 또한 이론적인 계산식을 바탕으로  $Q$  지수의 함수값을 확인하면, 비정질 수정과 단결정 실리콘의 지지부 에너지 손실은 같은 크기의 구조에서 거의 같음을 확인할 수 있다.

## 2.3 비정질 수정과 단결정 실리콘의 Q 지수 분석

### 2.3.1 비정질 수정의 Q 지수 곡선

열탄성 감쇠와 지지부 감쇠는 공진 중에 내부적으로 동시에 소진되는 에너지이므로 두 요소의 종합적인 고려를 통하여 Q 지수의 양상을 예측할 수 있다. 앞서 유도한 비정질 수정의 열탄성 감쇠 곡선(그림 2-7-a)과 지지부 감쇠 곡선(그림 2-9-a)을 양팔보의 고정된 길이값에 따라 종합하면 그림 2-10과 같다.

그림 2-10의 각 그래프는 열탄성 감쇠 Q 지수, 지지부 감쇠 Q 지수 그리고 식 2-6과 같이 두 Q 지수의 역수의 합으로 계산된 전체 내부 에너지 손실에 의한 Q 지수 곡선을 도출한 결과이다. 그래프를 살펴보면 앞서 그림 2-7에서 도출한 비정질 수정 양팔보의 열탄성 감쇠 Q 지수 곡선에서 최저점 이후의 가파른 Q 지수 상승 특성이 지지부 감쇠 Q 지수와 함께 고려될 경우, 전체 Q 지수에서 극대점을 만드는 모습을 확인할 수 있다.

전술한 바와 같이 열탄성 감쇠로 인한 에너지 손실을 줄이기 위해서는 공진자 구조물의 열평형 주파수에 대하여 이격이 큰 공진 주파수의 설계가 필요하다. 따라서 열평형 주파수보다 작거나 큰 공진 주파수의 설계가 요구된다. 이 때, 비정질 수정 공진자의 경우, 열평형 주파수보다 높은 공진주파수 영역에서 열탄성 감쇠와 지지부 감쇠를 고려한 내부 에너지 손실 Q 지수의 최적화 설계가 가능하게 된다.

만약 공진자의 설계를 통해 지지부 감쇠를 더욱 줄일 수 있다면, 높은 열탄성 감쇠의 Q 지수 특징을 갖고 있는 비정질 수정 물질의 장점을 통해 더욱 높은 Q 지수의 극대점이 형성될 수 있게 된다.

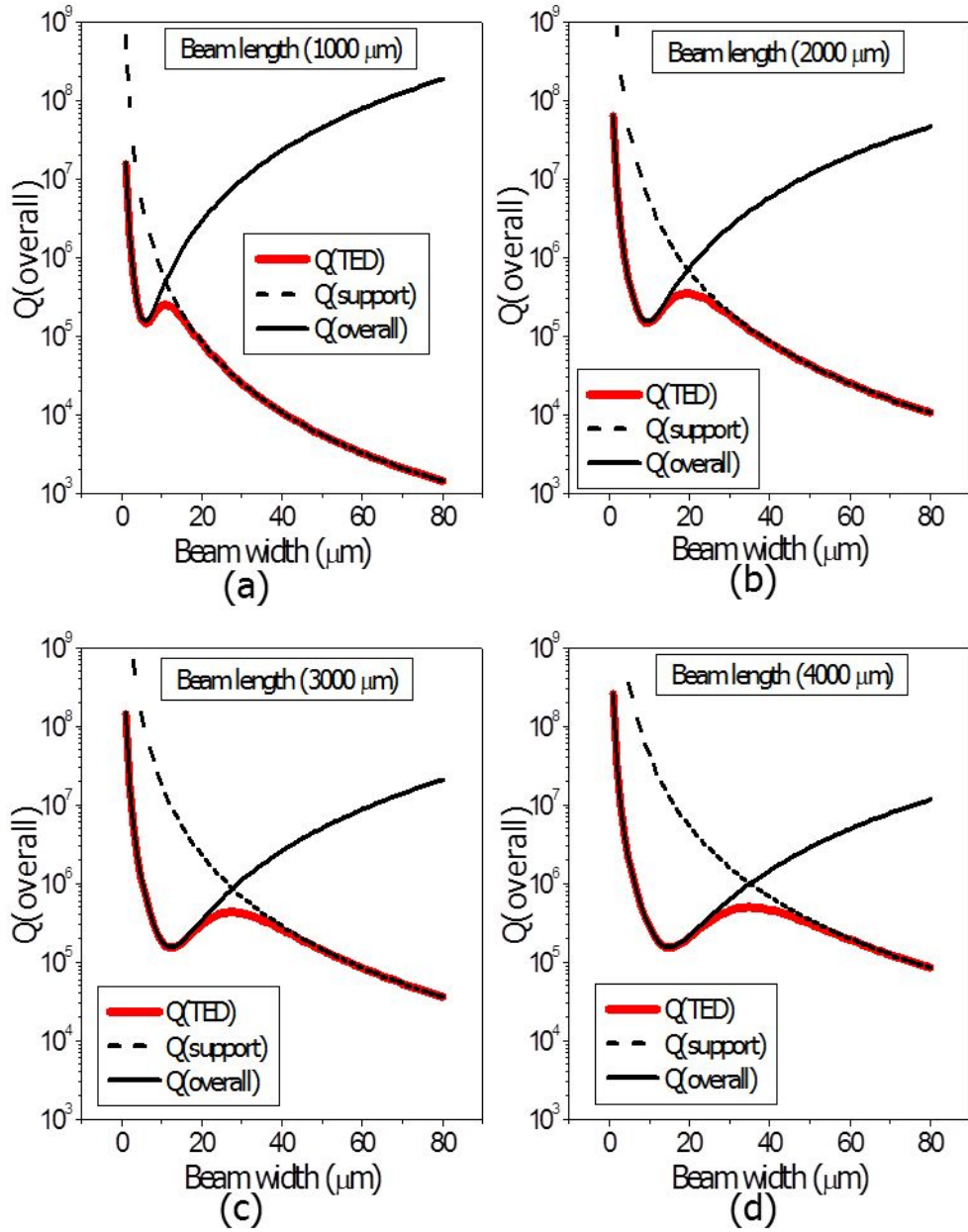


그림 2-10. 비정질 수정 양팔보 공진자의 고정된 길이( $L$ )에 대한  
열탄성 감쇠와 지지부 감쇠를 고려한 전체 내부 에너지 손실  $Q$  지수  
곡선 : (a)  $L = 1000 \mu\text{m}$  , (b)  $L = 2000 \mu\text{m}$  , (c)  $L = 3000 \mu\text{m}$  , (d)  
 $L = 4000 \mu\text{m}$

### 2.3.2 단결정 실리콘의 Q 지수 곡선

단결정 실리콘 양팔보에 대하여 그래프를 종합하면 그림 2-11과 같다.

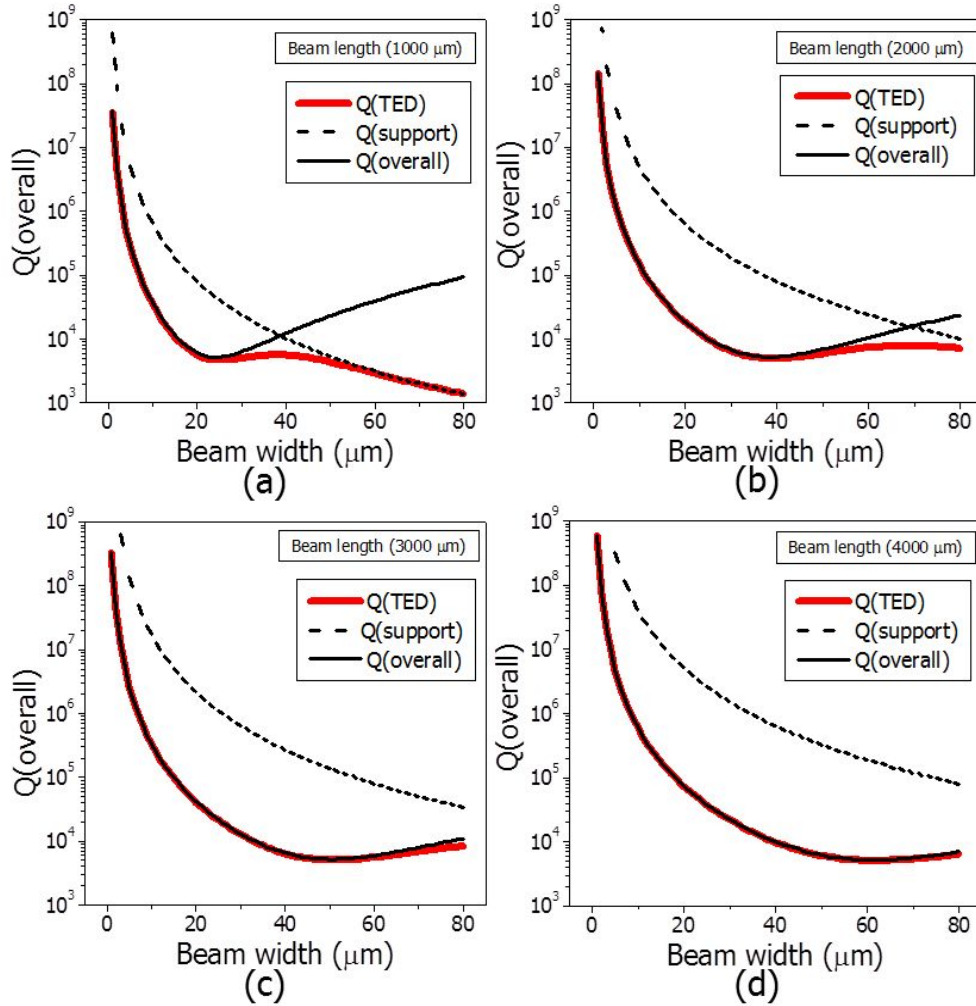


그림 2-11. 단결정 실리콘 양팔보 공진자의 고정된 길이( $L$ )에 대한  
열탄성 감쇠와 지지부 감쇠를 고려한 전체 내부 에너지 손실 Q 지수  
곡선 : (a)  $L = 1000 \mu\text{m}$ , (b)  $L = 2000 \mu\text{m}$ , (c)  $L = 3000 \mu\text{m}$ , (d)  
 $L = 4000 \mu\text{m}$



그림 2-11의 각 그래프에서 볼 수 있듯이 단결정 실리콘의 경우에는 지지부 감쇠의 Q 지수값이 열탄성 감쇠의 Q 보다 수준이 상대적으로 높은 값을 보이고 있어, 각 에너지 손실 요소의 역수의 합으로 계산되는 전체의 Q 지수는 상대적으로 낮은 열탄성 감쇠의 Q 지수를 따라가는 양상을 보이고 있다. 때문에, 비정질 수정과 같이 극대점이 확실히 나타나지 않는 특징을 갖고 있다. 따라서 단결정 실리콘 공진자의 경우, 열평형 주파수보다 낮은 공진 주파수 설계를 통해 열탄성 감쇠를 줄이게 되면, 전체 Q 지수를 향상 시킬 수 있음을 알 수 있다.

### 2.3.3 비정질 수정과 단결정 실리콘의 Q 지수 곡선 비교

앞서 도출한 비정질 수정과 단결정 실리콘의 Q 지수를 같은 크기의 구조물에 대해 비교하면 그림 2-12와 같은 그래프를 나타낼 수 있다.

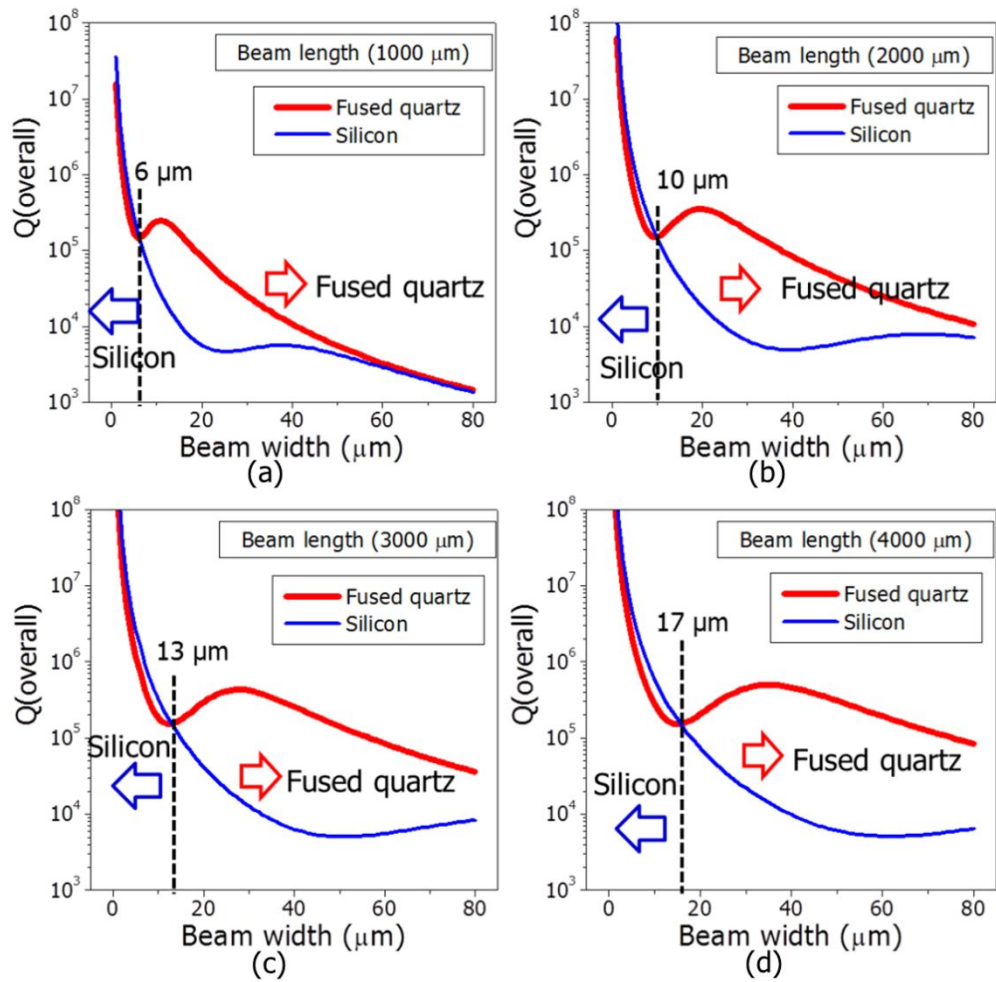


그림 2-12. 양팔보 공진자의 길이( $L$ )에 대한 비정질 수정과 단결정 실리콘의 Q 곡선 비교 : (a)  $L = 1000 \mu\text{m}$ , (b)  $L = 2000 \mu\text{m}$ , (c)  $L = 3000 \mu\text{m}$ , (d)  $L = 4000 \mu\text{m}$

위의 그래프를 통해 알 수 있는 사실은 비정질 수정과 단결정 실리콘의 경우, 어느 물질이 일방적으로 높은 Q 지수를 보이지는 않는다는 점이다. 즉, 같은 양팔보의 길이에 대하여 폭이 작아지면, 단결정 실리콘의 Q 지수가 우세한 영역이 존재하고, 역으로, 폭을 크게 하면, 비정질 수정이 우세한 영역이 발생하게 됨을 알 수 있다.

각 물질에 따른 높은 Q 지수 영역의 분기점을 양팔보의 길이와 폭에 대하여 표현하면, 아래의 그림 2-13과 같이 두 물질에 따라 높은 Q 지수를 구현할 수 있는 기준점을 나타낼 수 있다.

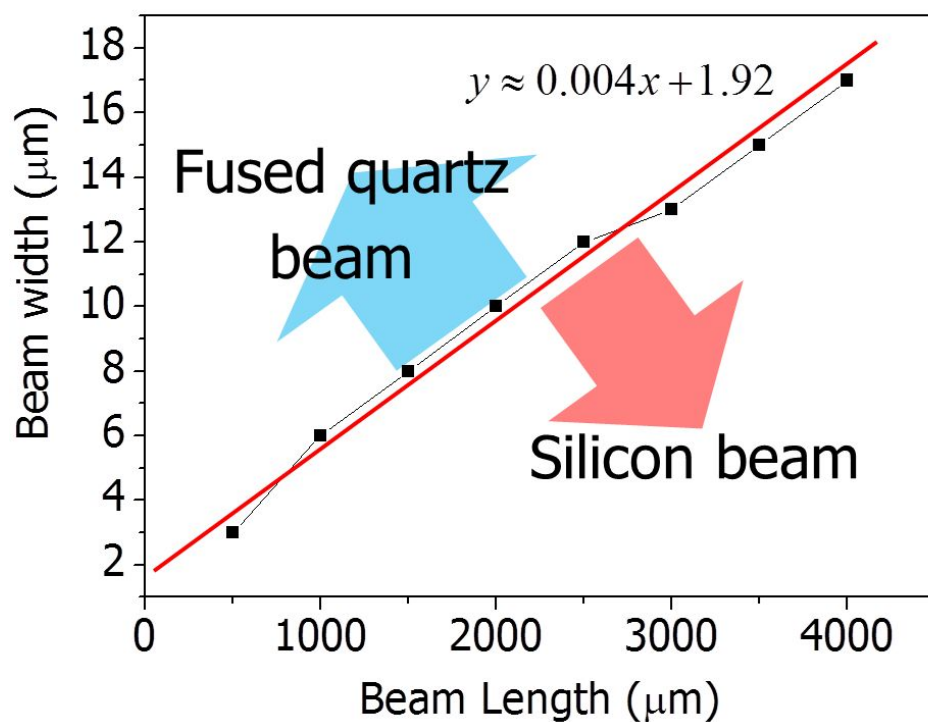


그림 2-13. 비정질 수정 과 단결정 실리콘의 높은 Q 지수 영역

위의 그래프에서, 각 물질에 따른 높은 Q 지수 영역을 구별짓는 기준점들을 연결하면, 폭과 길이의 비율이 약 1 : 250 이상에서는 비정질

수정의 Q 지수가 단결정 실리콘 보다 높게 형성됨을 알 수 있다. 반대로, 단결정 실리콘 물질을 사용하여 비정질 수정보다 높은 Q 지수를 구현하기 위해서는 폭과 길이의 비율이 1 : 250 이하의 빔 구조물을 구현하여야 한다. 예를 들어, 단결정 실리콘으로 만들 경우, 길이가 1000  $\mu\text{m}$  라면, 4  $\mu\text{m}$  이하의 폭으로 구현되어야 한다. 그러나 이러한 얇고 긴 양팔보 혹은 스프링을 설계할 경우, 구조의 안정성이 떨어지는 단점이 발생할 수 있다.

### 2.3.4 공진 주파수 측면에서의 Q 지수 분석

지금까지 열탄성 감쇠와 지지부 감쇠를 고려한 Q 지수 곡선을 양팔보의 폭( $w$ )을 변수로 하여 표현한 그래프를 기준으로 설명하였다. 그런데 양팔보의 공진 주파수 또한 길이( $L$ )를 고정할 경우, 폭( $w$ )에 대해 비례하게 된다. 따라서 열탄성 감쇠와 지지부 감쇠의 곡선을 그림 2-14와 같이 공진 주파수 측면에서 분석할 수 있다.

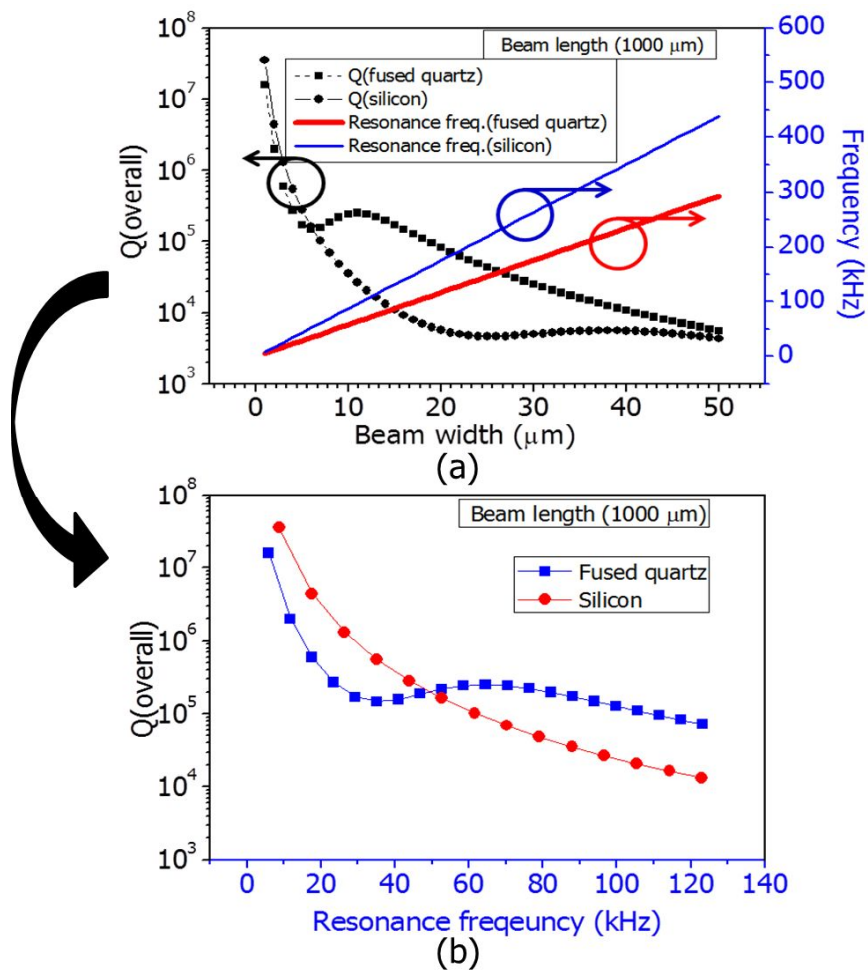


그림 2-14. 서로 다른 변수에 의한 Q 지수 곡선 : (a) 양팔보의 폭( $w$ )을 변수로 한 Q 지수, (b) 공진주파수를 변수로 한 Q 지수

아래의 그림 2-15는 양팔보의 공진주파수에 대한 비정질 수정과 단결정 실리콘의 Q 지수를 나타낸 것이다.

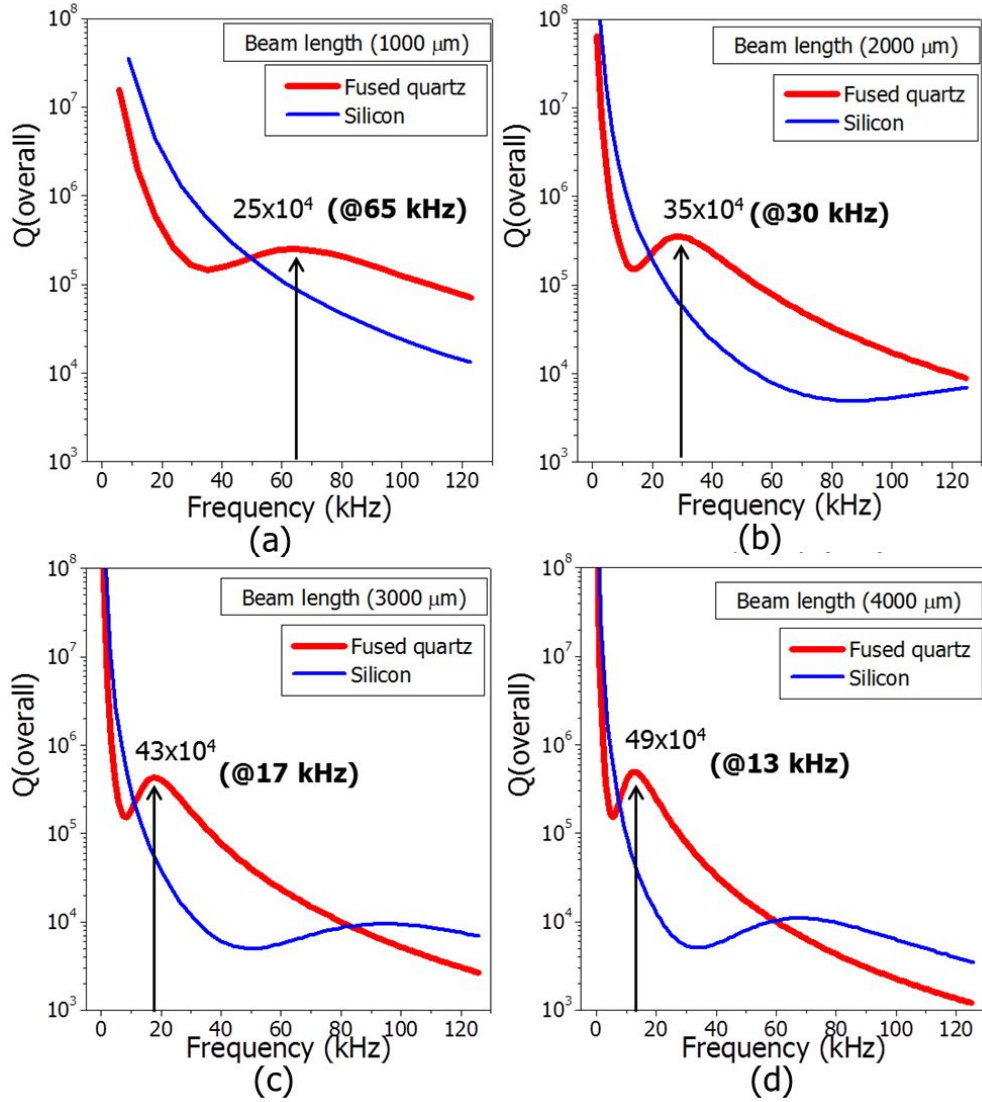


그림 2-15. 비정질 수정 및 단결정 실리콘 양팔보 공진자의 공진주파수에 대한 Q 지수 비교 : (a)  $L = 1000 \mu\text{m}$  , (b)  $L = 2000 \mu\text{m}$  , (c)  $L = 3000 \mu\text{m}$  , (d)  $L = 4000 \mu\text{m}$

위의 그래프를 보면, 공진 주파수 기준으로 Q 지수를 바라볼 때에도 앞의 경우와 마찬가지로 단결정 실리콘보다 비정질 수정의 Q 지수가 큰 영역에서, 극대점이 존재한다는 것을 확인 할 수 있으며, 이 같은 극대점은 각각의 공진 주파수에 대해 1:1 로 대응됨을 확인할 수 있다. 즉, 비정질 수정의 경우, 설계된 공진 주파수에 대하여 Q 지수를 최대로 하는 길이와 폭의 값이 결정될 수 있는 것이다.

이러한 극대점들의 대응되는 공진 주파수 영역을 기준으로 다시 그래프를 그리면, 아래와 그림 2-16과 같이 대응점들을 나열할 수 있는데, 각각의 극대점들의 공통점을 보면, 길이 대비 폭의 비율이 약 100 : 1 을 이루는 부분에서 Q 지수의 최적화를 이룰 수 있는 것을 알 수 있다.

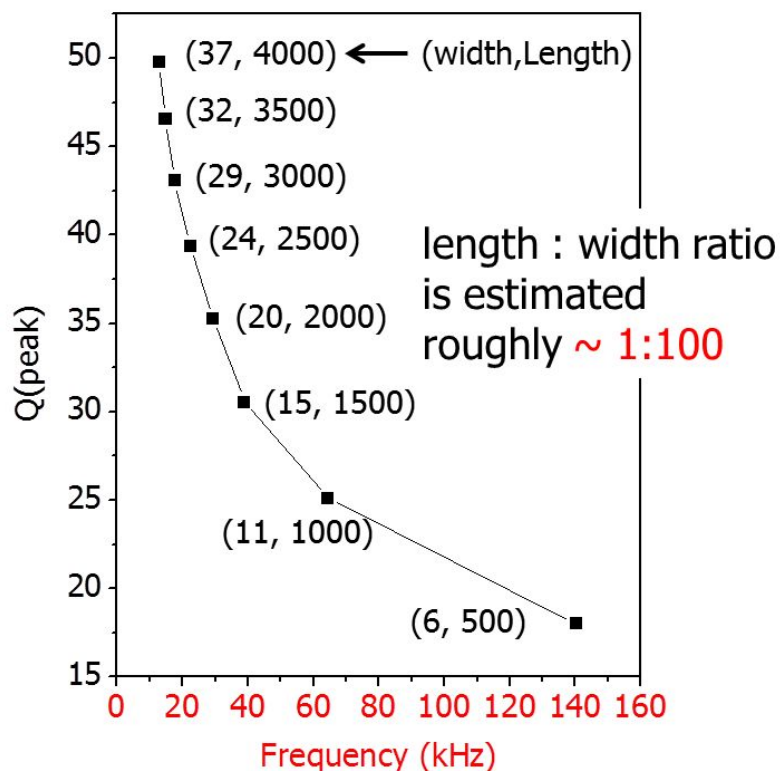


그림 2-16. 공진 주파수 대비 Q 지수 극대점 (비정질 수정)

## 제 3 장 수정-수정 접합 공정

### 3.1 직접 접합의 특징 및 접합 메커니즘

#### 3.1.1 직접 접합 (direct bonding) 의 특징

MEMS 공정에서 웨이퍼의 접합 기술은 웨이퍼 레벨 패키징 또는 surface micro-machine 공정을 이용하여 복잡한 구조물을 제작에 응용할 수 있다는 점에서 커다란 장점을 가진다. 웨이퍼의 접합 방식은 크게 중간 매개층(interlayer)의 유무에 따라 그림 3-1과 같은 간접 접합(non-direct bonding)과 그림 3-2와 같은 직접 접합(direct bonding)으로 나눌 수 있다. 그 중 직접 접합 방식은 중간 매개층(interlayer)이 없다는 측면에서 아래와 같은 몇 가지 장점을 갖는다.

첫째, 웨이퍼의 표면처리와 외부로부터의 전기장 혹은 압력만으로도 간단한 접합 공정이 이루어진다. 둘째, 웨이퍼 표면의 직접 접촉을 유도하기 때문에 중간층으로 인한 cavity 혹은 creeping을 방지할 수 있으므로, 견고한 밀폐(hermetic sealing)와 더불어 경년변화(aging) 및 온도에 대한 안정성을 기대할 수 있다. 셋째,  $O_2$  plasma 표면처리와 같은 표면 활성화를 통하여, 저온 접합 공정을 구현할 수 있다.

MEMS 공정에서 SOG(silicon-on-glass) 웨이퍼의 제작 방법으로 많이 쓰이고 있는 양극 접합(anodic bonding)은 중간 매개층이 없다는 측면에서 직접 접합의 범주에 속할 수 있지만, glass와 silicon 웨이퍼의 접합면에 전계를 형성하기 위하여 500 ~ 1000V의 고전압과, 300 °C 이상의 고온 조건을 형성 해야한다 [26]. 하지만 이 경우 고온과 고전압에 의한 구조물의 응력 혹은 금속 전극층의 변형과 같은 단점이



발생할 수 있다.

본 논문에서 이용하고자 하는 비정질 수정 웨이퍼의 경우, 유리 웨이퍼에 존재하는 나트륨 이온이 없기 때문에, 양극 접합 공정을 적용할 수 없다. 따라서 웨이퍼의 표면 개질과  $O_2$  플라즈마 표면처리와 같은 표면에너지 활성화를 통하여 직접 접합 공정을 마련할 필요가 있었다.

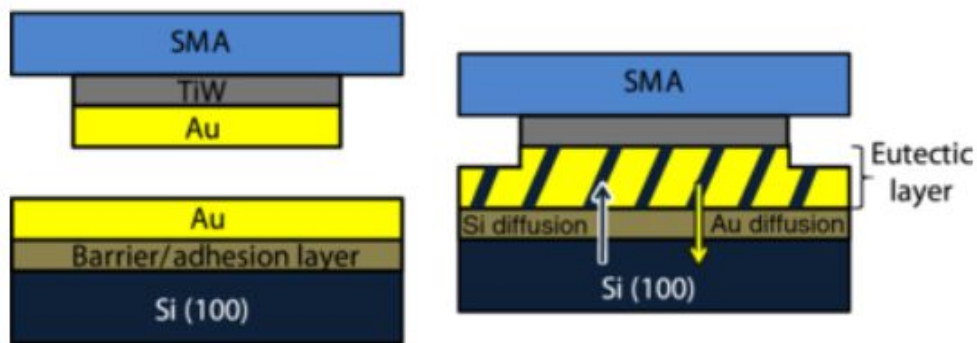


그림 3-1. Eutetic bonding의 모식도(간접 접합)

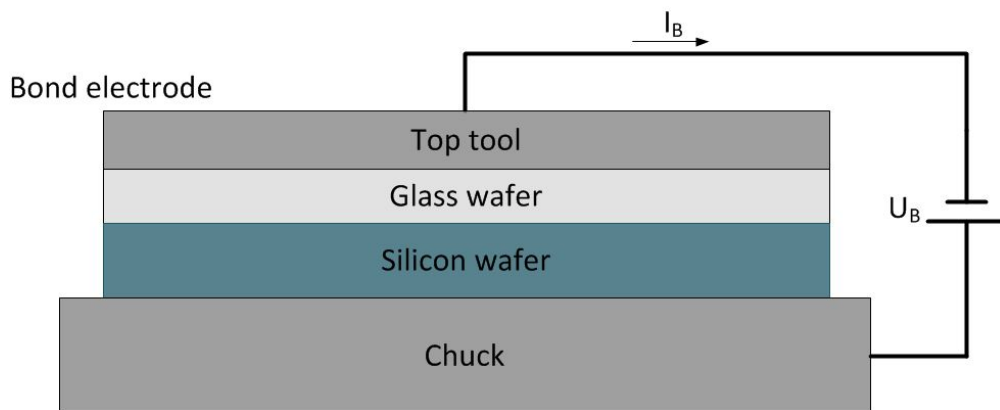


그림 3-2. Anodic bonding의 모식도(직접 접합)

### 3.1.2 표면개질을 통한 직접 접합의 이론적 메커니즘

웨이퍼의 표면개질에 의한 직접 접합은 친수성 방식과 소수성 방식으로 나눌 수 있다 [27,28]. 하지만 두 방식 모두 그림 3-3 과 같은 공통 과정을 통해 접합이 이루어진다. 먼저 웨이퍼 표면의 세척(RCA1, SPM 세척 등)을 통하여 웨이퍼 표면의 먼지나 유기물과 같은 오염원을 제거하고, 웨이퍼의 표면을 개질 시킨 후, 웨이퍼 표면의 van der Waals force 혹은 분자 결합을 이용한 초기 접합 (weak bonding)을 실시한다. 이후 열처리를 통하여 분자간의 결합을 원자간의 공유결합으로 전환시킴으로써 접합력을 증가시키는 과정을 거치게 된다 [27].

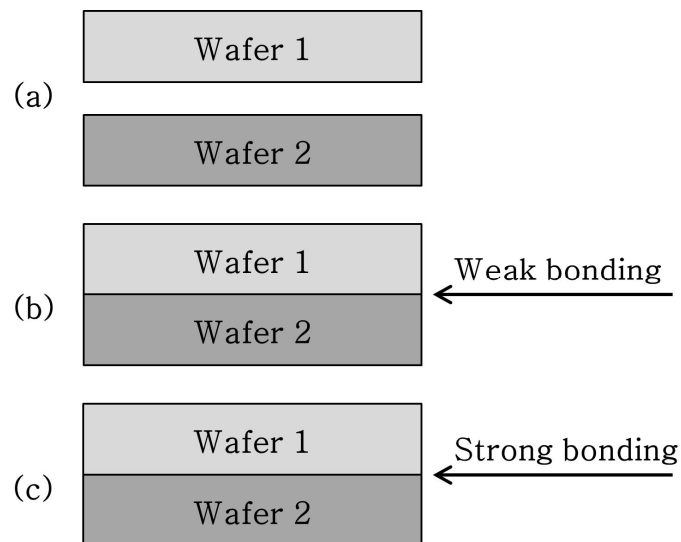
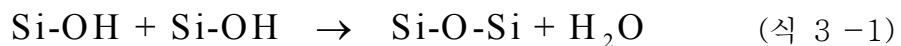


그림 3-3. 직접 접합 순서도 : (a) 표면 처리 (웨이퍼 세척 및 연마), (b) 초기 접합 (분자결합), (c) 열처리 (공유 결합)

### 3.1.2.1 친수성 접합

친수성 직접 접합은 Si 웨이퍼 표면의 자연산화막(native oxide)을 이용하는 접합 방식으로 Si-OH 기(silanol group)의 OH 기와 웨이퍼 세척 시 표면에 잔류한 물분자 (H-O-H)의 결합을 이용한다 [27,29]. 친수성 직접 접합에서 웨이퍼 표면의 반응과정을 도시하면 그림 3-4 와 같다. 먼저 웨이퍼의 세척 또는 표면 처리를 통해 웨이퍼 표면에 물 분자층이 형성이 되는데 이는 초기 접합 시에 약한 결합(weak bonding)을 만드는 매개층으로 역할을 하게 된다. 이후 열처리를 통해 접합면의 물 분자는 밖으로 기화하거나, 실리콘 웨이퍼 표면과 반응하여 Si-OH 결합수를 늘리게 된다. 이때, 그림 3-4-b 와 같이 silanol 기 사이의 결합이 발생하게 되는데 이때, 두 OH 기 사이에서 van der Waals 결합력이 작용하게 된다. 이후 열처리를 더욱 진행하게 되면, 화학반응식 3-1 을 통해 최종적으로 물분자가 빠져나오게 되고, Si-O-Si(siloxane) 결합이 형성되어, 비가역적 결합이 이루어진다. H.moriceau et al.은 Si 웨이퍼의 표면 세척 (SPM, SC1, RCA1 등), 열처리 온도 그리고 웨이퍼 표면의 거칠기 조절을 통해 결합력을 조절하여 분리 가능한 실리콘 웨이퍼의 접합을 연구한 바 있다 [29].



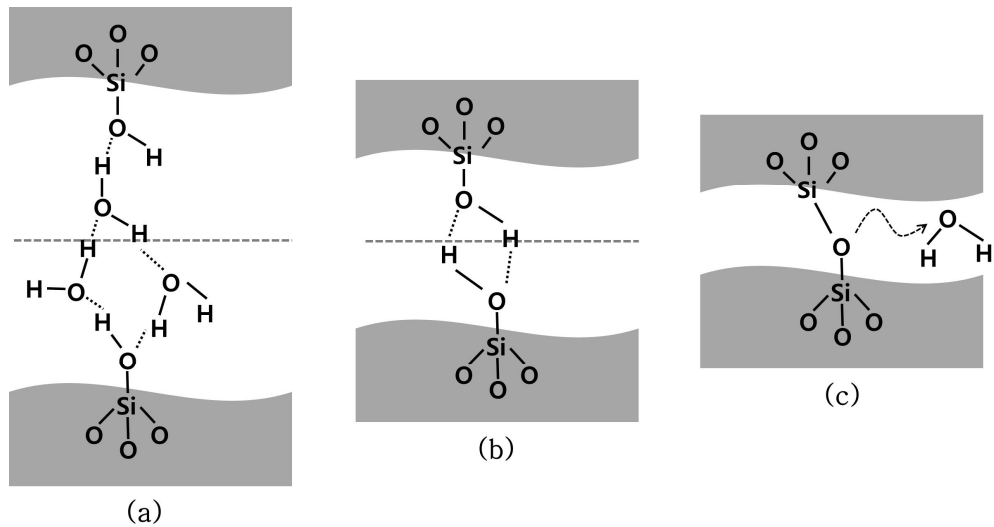


그림 3 - 4. (a) 물 분자층을 매개로한 접합 상태, (b) 두 OH 기의 van der Waals 힘을 이용한 접합 상태, (c) Si-O-Si 결합을 통한 접합 상태 [28]

### 3.1.2.2 소수성 직접 접합

소수성 직접 접합은 HF 용액으로 실리콘 웨이퍼의 자연산화막을 제거한 후 접합면에 잔존하는 HF 분자들을 매개로 하여 초기 접합이 형성된다. 이후 열처리 과정에서 화학반응식 3-2 와 같이 H 와 F 분자들이 접합면을 빠져나가고, 접합면의 Si 분자들의 공유결합을 통해 접합이 이루어지게 된다. 소수성 직접 접합의 과정은 그림 3-5 와 같이 도시할 수 있다 [28]. 하지만, 친수성 직접 접합과는 달리 소수성 접합과정은 자연산화막을 이용하지 않기 때문에, 웨이퍼의 표면의 자연산화막이 발생하지 않도록 단 시간에 초기 접합이 이루어져야 하며, 열처리 또한 약 300 ~ 700 °C 로 높은 조건이 요구된다. 또한 웨이퍼 표면에  $H_2$  가 남게되는 경우 접합면에 공동(void)이 형성될 수 있다는

단점이 존재한다.

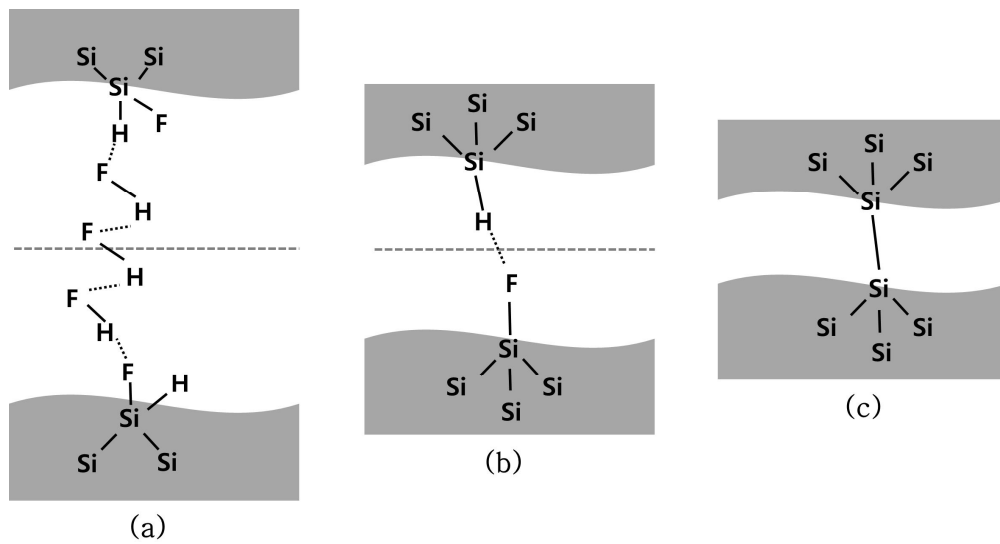
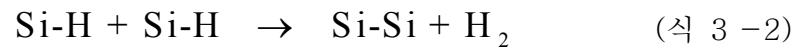


그림 3-5. (a) HF 분자를 매개로 한 접합 상태, (b) H와 F 원자간의 van der Waals 힘에 의한 접합 상태, (c) Si-Si 공유결합을 통한 접합 상태 [28]

### 3.1.3 O<sub>2</sub> 플라즈마 표면 처리

웨이퍼의 표면 개질 이후 열처리 과정만을 통해 접합을 진행할 경우, 온도를 800 ~ 1000 °C 로 높게 유지해야 하는 단점이 발생한다 [30]. 이러한 문제점을 해결하기 위해 플라즈마 처리를 통하여 접합면의 반응성을 향상시키는 방법이 연구되었다 [31, 32].

특히 O<sub>2</sub> 플라즈마를 활용한 bonding 공정이 친수성 직접 접합 방법에 응용되었으며, Liu, Zhixiong et al.은 그림 3-6 과 같이 약 300 °C 이하의 열처리 조건에서도 이전의 방법들에 비해 접합력을 향상시킨 실험 결과를 발표하였다 [31].

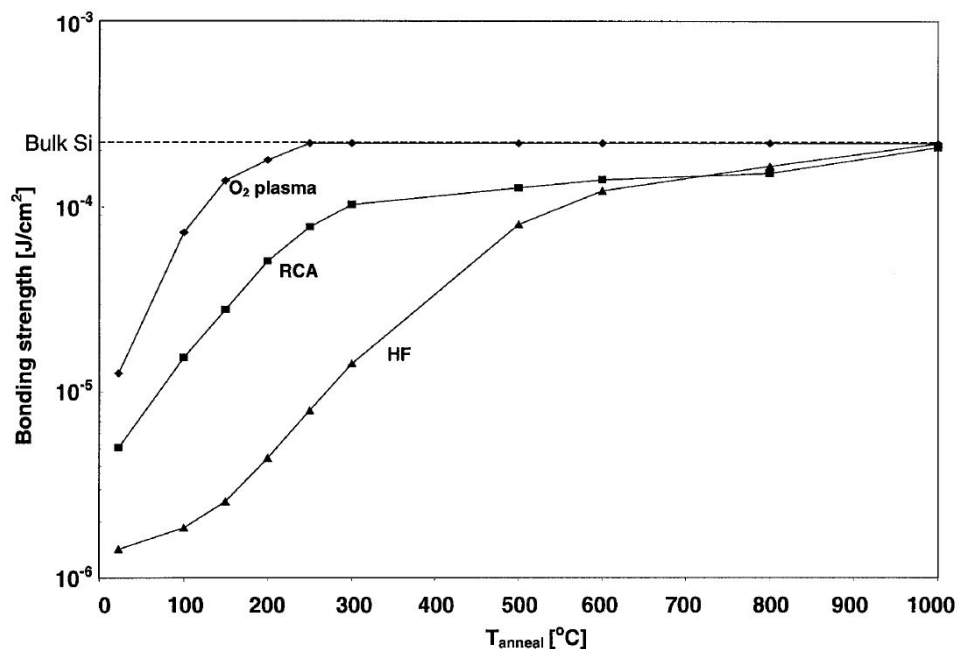


그림 3-6. 열처리 온도에 따른 접합력 실험 결과 [31].

## 3.2 수정-수정 직접 접합 공정

### 3.2.1 수정-수정 접합 공정 순서

수정 웨이퍼의 물질은 산화 실리콘( $\text{SiO}_2$ )이므로 기본적인 접합 메커니즘은 Si wafer의 산화막을 이용한 친수성 직접 접합 방식과 크게 달라지지 않지만, 플라즈마 처리 시간 혹은 열처리 시간에 따른 접합 조건을 새롭게 확립할 필요가 있었다. 그림 3-7은 본 논문을 통해 확립된 수정-수정 접합의 순서도이다.

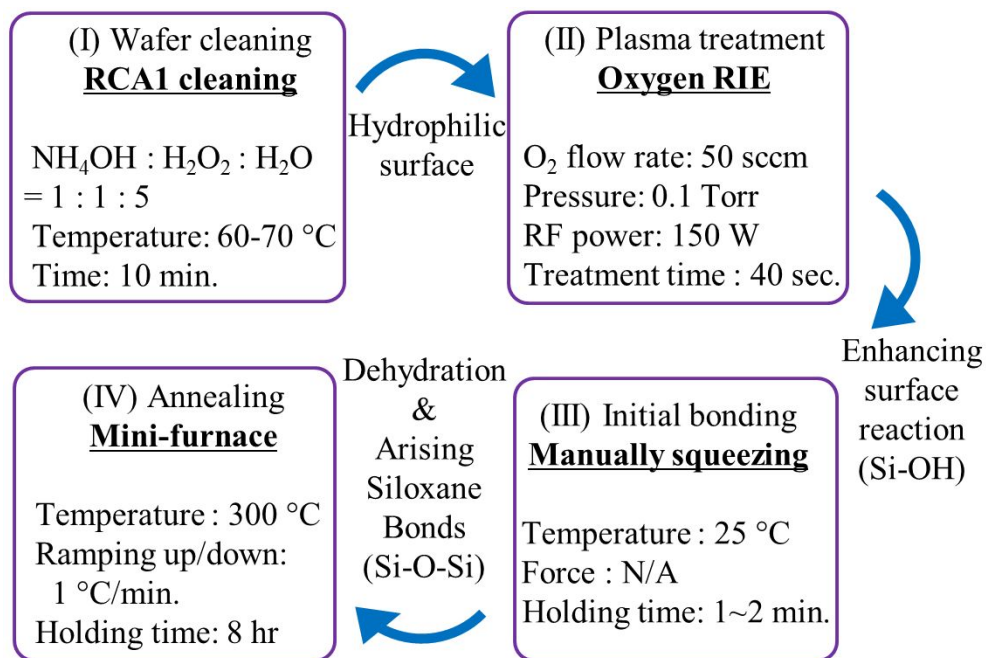


그림 3-7. 수정-수정 직접 접합 순서도

먼저 RCA1 세척을 통해 웨이퍼 표면의 유기물이나 기타

오염물질들을 제거하고 웨이퍼 표면을 친수성으로 개질 시킨다. 이후  $O_2$  플라즈마 처리를 통하여 웨이퍼 표면의 OH 기를 활성화 시킨다. 활성화된 접합면을 상온, 상압의 환경에서 물리적 접촉을 통해 초기 접합을 실시한다. 이 때, 접합면에서는 웨이퍼 표면의 물 분자와 더불어 활성화된 OH기의 van der Waals 힘이 작용하여 접합 상태가 된다. 이후 8 시간 동안  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  에서 열처리를 실시하여 접합면의 Si-O-Si 공유결합을 유도하게 된다.



### 3.2.2 수정-수정 접합 웨이퍼의 성능 평가

#### 3.2.2.1 직접 접합 웨이퍼의 열응력

본 논문에서 제안한 수정-수정 웨이퍼 접합 공정은 동종 접합 공정을 통해 열처리 과정에서 발생하는 열응력(thermal stress)을 최소화 하기 위한 목적이 있다. Si-glass 혹은 Si-quartz 와 같은 이종 접합(heterogeneous wafer bonding)의 경우 서로 다른 열팽창계수로 인하여 접합의 열처리 과정에서 불가피하게 열응력이 발생하게 된다. 이러한 열응력은 접합 이후 잔류응력으로 작용하여 MEMS 구조물 제작 시 혹은 제작 이후에 성능에 큰 영향을 미치게 된다. 더욱이 직접 접합의 경우 접합의 매개층이 없으므로 이러한 열응력의 부정적인 영향은 커질수 밖에 없게 된다. 따라서 직접 접합의 공정은 저온 접합 조건의 확립이 필수적이다 [33].

그림 3-8 의 그래프에서와 같이 실리콘과 비정질 수정 (fused quartz, vitreous silica)은 온도가 증가할수록 열팽창계수의 차이가 점점 커지게 된다. L.R. Pinckney 가 보고한 바에 의하면, 상온에서 500 °C 의 온도 범위에서 실리콘과 비정질 수정의 열팽창 계수의 차이는 약 6 ~ 8 배 가량 증가하는 것으로 나타나고 있어 Si 과 비정질 수정 웨이퍼의 이종접합은 Si-glass 혹은 Si-Si 접합에 비해 큰 열응력이 발생할 것으로 예상되었다 [34].

그림 3-9 는 Si 웨이퍼와 비정질 수정 웨이퍼의 이종접합으로 제작된 double-ended-tuning fork 의 SEM 사진으로서 실제로 실리콘과 비정질 수정의 이종접합을 통해 MEMS 구조물을 제작할 경우, 열응력으로 인한 균열이 발생하는 것을 확인 할 수 있었다.

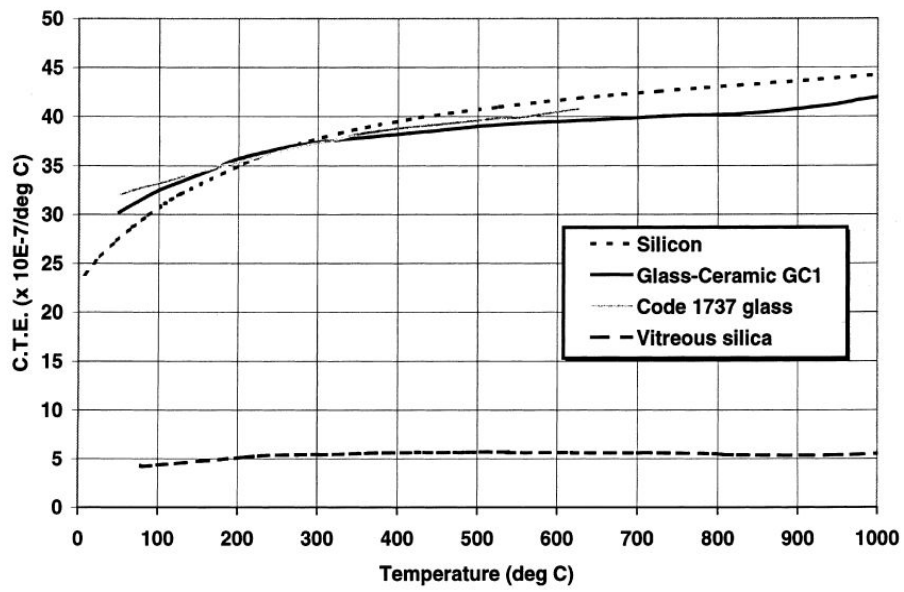


그림 3-8. 온도 변화에 따른 열팽창 계수의 변화

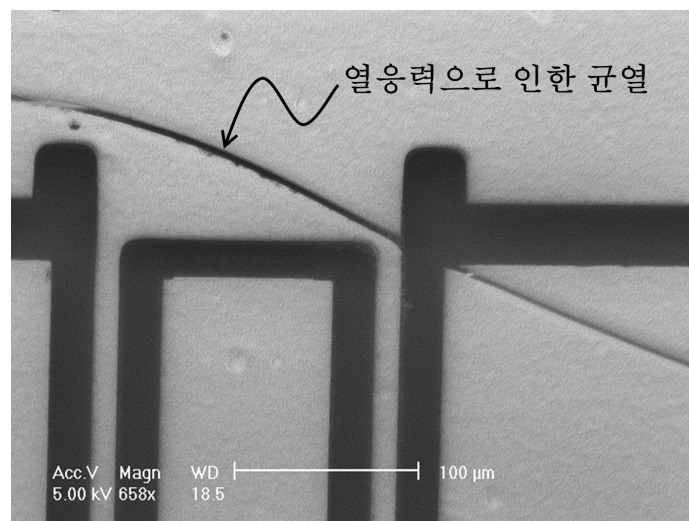


그림 3-9. 열 응력으로 인한 구조물의 균열

### 3.2.2.2 수정-수정 웨이퍼의 응력 실험

수정-수정 접합 웨이퍼의 열응력에 대한 유효성을 확인하기 위하여 그림 3-10 과 같이 Si-수정 접합 웨이퍼와 수정-수정 접합 웨이퍼를 제작하였다. 제작 조건은 앞서 설계한 직접 접합 순서도를 따라 진행하였다. 공정 결과 두 접합 웨이퍼 모두 접합 불량 영역이 관찰되지 않았으므로, 그림 3-11 과 같이 접합 웨이퍼의 곡면을 측정하여 열응력의 간접적인 크기를 비교할 수 있었다.

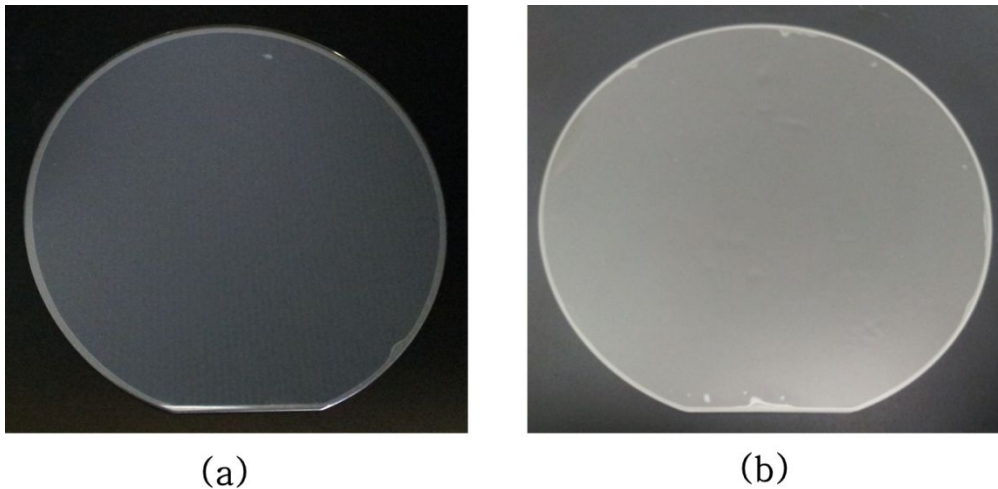


그림 3-10. 직접 접합 웨이퍼 : (a) Si-수정 접합 웨이퍼, (b) 수정-수정 접합 웨이퍼

곡면 측정은 FLX-2320(KLA TENCOR)장비를 사용하여 진행하였으며, 접합 전후의 웨이퍼의 bow 길이를 측정하여 곡률 반경을 계산하고, 열응력의 크기를 측정하였다.

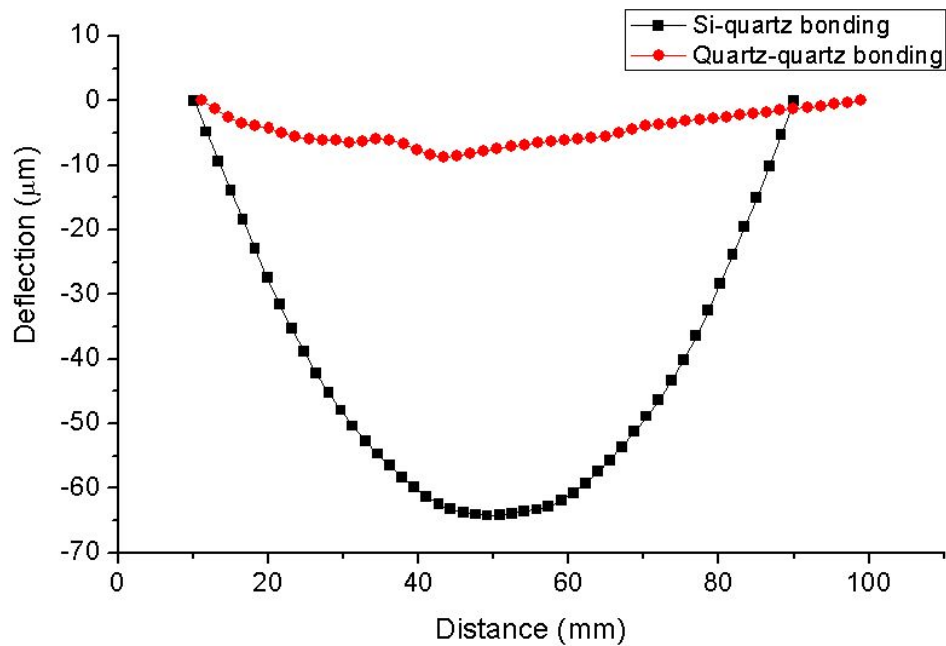


그림 3-11. Si-수정 & 수정-수정 접합 웨이퍼의 bending 측정 결과

측정 결과를 정리하면 표 3-1 과 같다.

표 3 - 1. 접합 웨이퍼의 열응력 측정 결과

접합	Bow ( $\mu\text{m}$ )	곡률반경 (m)	응력 (Mpa)	방향
Si-수정	- 64.19	12.32	1.3	tensile
수정-수정	-8.72	135.40	0.1	tensile

측정 결과 앞서 그림 3-8 의 그래프에서 예상했던 바와 같이 동종 접합인 수정-수정 접합이 이종 접합인 Si-수정 웨이퍼보다 약 1/13 배 작은 응력 분포를 보이고 있음을 확인 할 수 있었다.

### 3.2.2.3 O<sub>2</sub> 플라즈마에 의한 표면에너지

본 논문에서 제안하는 수정-수정 접합은 친수성 직접 접합을 활용하고 있다. 그리고 열처리 이후의 잔류응력을 최소화 하기 위해서는 300 °C 미만의 저온 열처리 조건을 확립할 필요가 있었다. 이때, 저온 열처리 조건을 유지하면서도 접합력의 크기를 극대화 하기 위해서는, 웨이퍼의 접합에 관여하는 OH 기의 증가와 활성화가 필수적이다. 따라서, O<sub>2</sub> 플라즈마 처리 시간에 의한 웨이퍼의 표면에너지를 측정하여, 가장 높은 표면 에너지를 보이는 공정 조건을 확립할 필요가 있었다. 플라즈마 처리 시간에 따른 웨이퍼 표면에너지의 크기는 접촉각(contact angle) 측정 실험을 통해 간접적으로 측정하였다. O<sub>2</sub> 플라즈마 표면처리는 반도체 공동 연구소 내에 있는 Plasmalab 80 Plus (Oxford instruments) 장비의 RIE 모드를 통해 실시하였다. 실험에 대한 고정 변인은 아래 표 3-2와 같다.

표 3 - 2. O<sub>2</sub> 플라즈마 처리 시 고정변인

RF power (W)	O <sub>2</sub> flow-rate (sccm)	Pressure (mTorr)	Temp. (°C)
150	50	100	~ 10

실험 변인은 플라즈마 처리 시간으로 0 ~ 60 sec 초기에는 5 sec, 30 sec 이후는 10 sec 하여 모두 10개의 변인을 설정하였으며, 각 변인 당 측정 시편의 개수는 3 ~ 5 개로 설정하였다. 접촉각의 실험 결과는 다음 그림 3-12와 같이 측정되었다.

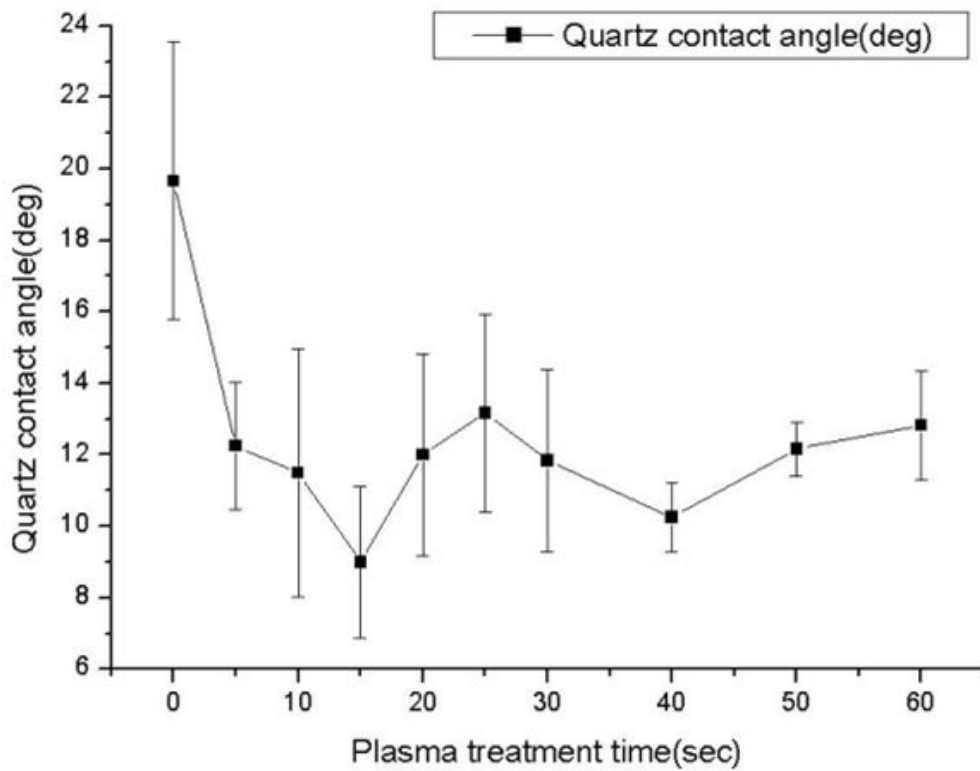


그림 3-12. 수정 웨이퍼의 접촉각 측정 실험

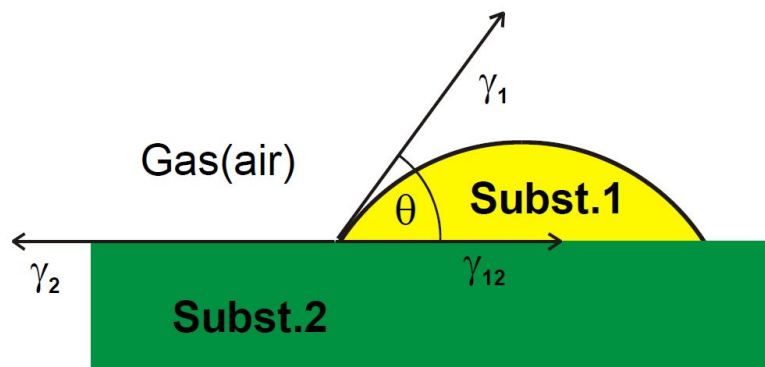


그림 3-13. 액적을 이용한 접촉각 측정 모식도

접촉각은 그림 3-13과 같이 고체 기판 표면에 액체와 공기가 동시에

맞닿는 부분의 액적의 기울기를 측정하였다. 그리고 웨이퍼의 표면에너지를 도출하기 위하여 접촉각, 고체 기판과 공기의 표면장력( $\gamma_2$ ), 공기와 액적의 표면장력 ( $\gamma_1$ ) 그리고 액적과 고체 기판의 표면장력 ( $\gamma_{12}$ ) 관계를 식 3-3에 적용할 수 있었다. 이때,  $\gamma_1$  과  $\gamma_2$  의 관계는 식 3-4로 정의할 수 있으므로, 고체 기판의 표면 장력 (표면에너지,  $\gamma_2$ )는 식 3-5를 통해 계산할 수 있다 [35].

$$\gamma_2 = \gamma_{12} + \gamma_1 \cos \theta \quad \text{식 (3 - 3)}$$

$$\gamma_{12} = \gamma_1 + \gamma_2 - 2\sqrt{\gamma_1 \times \gamma_2} e^{-\beta(\gamma_1 - \gamma_2)^2} \quad \text{식 (3 - 4)}$$

$$\gamma_2 = \frac{\gamma_1(1 + \cos \theta)^2}{4} \quad \text{식 (3 - 5)}$$

접촉각 실험 결과로부터 환산된 수정 웨이퍼의 표면에너지는 그림 3-14 와 같이 그래프로 나타낼 수 있었다.

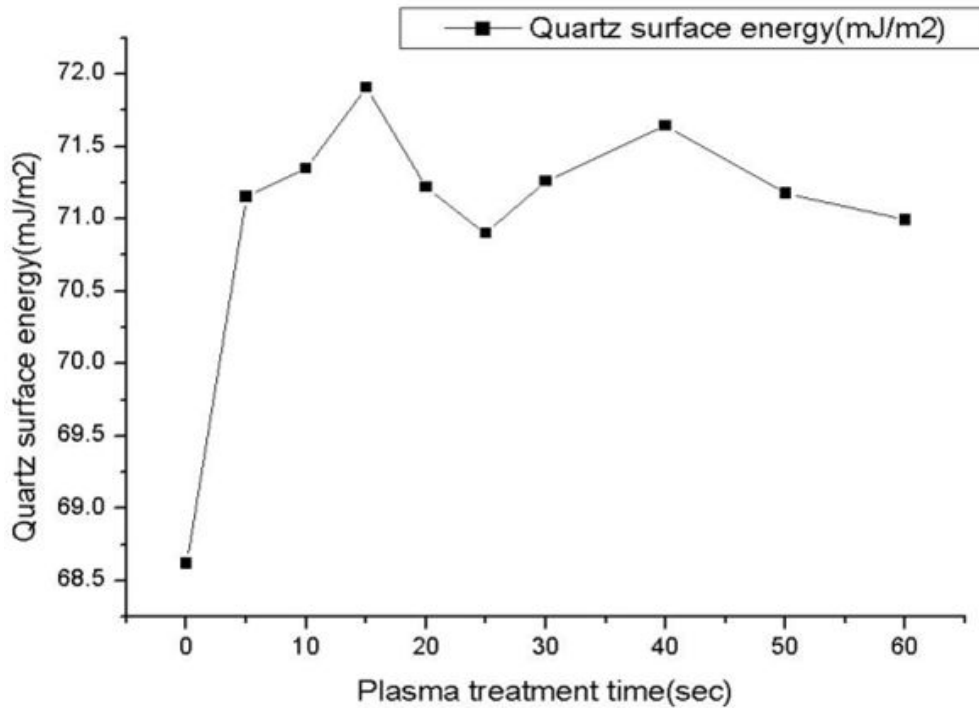


그림 3-14. 플라즈마 처리시간에 따른 수정 웨이퍼의 표면에너지

환산된 표면에너지의 분포값을 보면, 플라즈마를 처리하지 않을 때와 처리할 때의 표면에너지는 약  $3 \text{ mJ/m}^2$  이상의 차이를 보였으며, 이후 15 초와 40 초에서 약  $72 \text{ mJ/m}^2$  의 높은 표면 에너지 분포를 보임을 확인할 수 있었다. 이를 바탕으로 초기 접합에서 접합력을 최대로 하는 플라즈마 처리 시간은 15 초 혹은 40 초에서 형성됨을 확인 할 수 있었다.



### 3.2.2.5 O<sub>2</sub> 플라즈마 처리에 따른 접합력 측정

앞서 진행한 접촉각에 의한 표면에너지 측정 실험을 바탕으로 접합력을 최대로 할 수 있는 접합 조건을 도출하기 위하여 앞의 실험과 동일한 플라즈마 처리 시간을 변수로 하여, 접합력 테스트를 진행하였다. 측정 실험은 그림 3-15 와 같이 DAGE-4000 의 전단력 모드(shear force mode)를 사용하였다. 측정 시편은 그림 3-16-a 와 같이 4.8 x 4.8 mm<sup>2</sup> 의 면적으로 다이싱되었다. 또한, 확실한 전단력을 인가하기 위하여, 시편의 한쪽끝에 측정 장비의 tip 을 위한 공간을 마련하였다.

전단력은 그림 3-16-(c)와 같이 시편의 접합면이 떨어지거나, 깨어질때 까지 인가하였다. 각 실험 조건에 대하여 5~6 개의 시편을 실험하여 평균값을 구하였다.



(a)



(b)

그림 3-15. 전단력 측정 기기(a)와 시편 홀더(b)

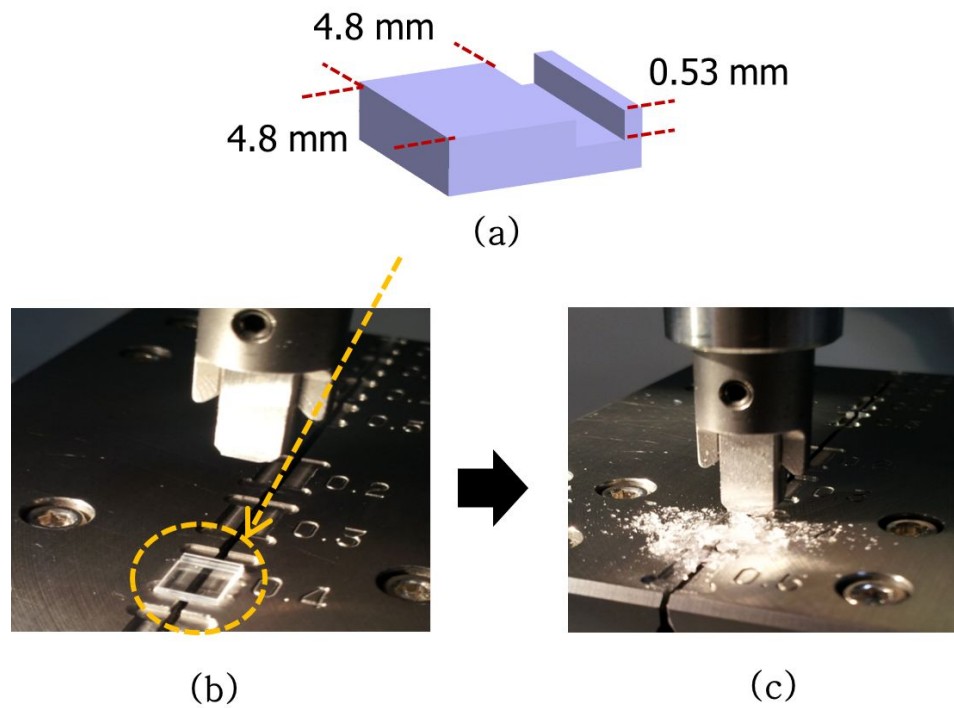


그림 3-16. 제작된 시편의 크기(a)와 전단력을 인가하기 전의 상태(b),  
시편이 깨질 때 까지 전단력을 인가한 모습(c)

또한 같은 플라즈마 처리 조건에서 실리콘-수정 접합 웨이퍼의 시편을 마련하여, 수정-수정 웨이퍼와 실리콘 수정 웨이퍼의 접합력을 그림 3-17 과 같이 함께 비교하였다.

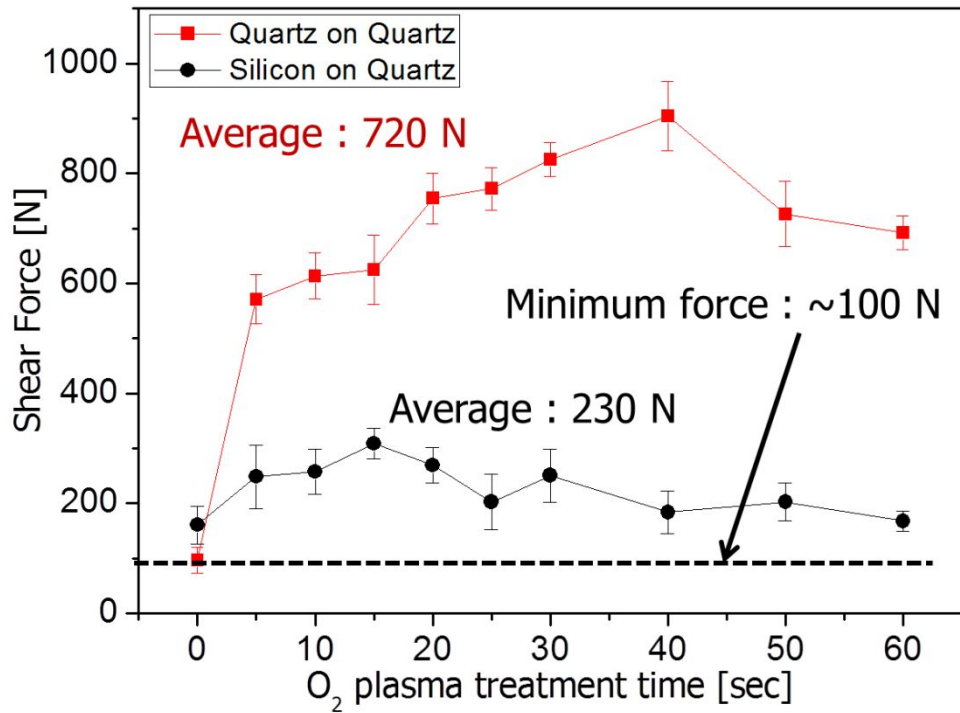


그림 3-17. 전단력 측정 결과

### 3.2.2.6 접합력 측정 결과의 분석

우선 수정-수정 웨이퍼의 접합력 테스트 결과를 분석해보면, 예상했던 플라즈마 처리 시간 40 초의 조건에서 가장 큰 접합력을 확인할 수 있었다. 하지만 접합력의 경향으로 미루어 볼 때, 1 분 이내의 플라즈마 처리 조건에서 플라즈마 처리 시간 보다는 플라즈마 처리의 유무에 따라 접합력이 많은 영향을 받는 것으로 나타났다.

플라즈마 처리 시간에 대한 접합력의 평균값은 약 720 N 으로 측정 되었으며, 실리콘-수정 접합 웨이퍼의 평균 접합력보다 3 배 이상 높은

수치를 보였다. 또한 수정-수정 웨이퍼, 실리콘-수정 웨이퍼의 접합력 모두 미 국방성(MIL-STD-883F)에서 제시하는 최소 접합력인 100 N 보다 큰 값을 보여 접합 이후 CMP 혹은 박막화 공정과 같은 bulk micro-machining에 충분히 적용 가능할 것으로 판단되었다.

측정된 수정-수정 웨이퍼의 평균 접합력을 시편의 면적을 고려한 전단응력(shear stress)으로 환산하면 약 31.3 MPa 이 되는데, 이는 비정질 수정 물질의 한계 전단응력의 1/2 에 해당하는 것으로서 수정-수정 웨이퍼의 접합력 크기를 정성적으로 판단할 수 있다. 이러한 실험 결과를 통하여 수정 기반의 MEMS 구조물을 제작할 경우, 실리콘-수정 접합 웨이퍼 보다 수정-수정 접합 웨이퍼가 더욱 공정에 대한 안정성을 가질 것으로 판단되었다.

#### 3.2.2.6 접합 웨이퍼의 재연성 실험

지금까지 진행한 접합 조건의 실험 이외에 접합에 대한 신뢰성을 확인하기 위하여, 접합 공정의 재연성 실험을 할 필요가 있었다. 접합 공정의 O<sub>2</sub> 플라즈마 처리시간은 가장 높은 접합력 결과를 보였던 40 초로 결정하였고, 열처리 시간은 300 °C - 8 시간 조건을 적용하였다. 그림 3-18 은 재연성 실험에서 불량면적이 발생한 경우와 불량면적이 발생하지 않은 경우의 접합 웨이퍼를 촬영한 그림이다. 위의 그림 3-18-(a)는 접합 공정 시 웨이퍼 표면의 작은 먼지로 인하여 불량 면적이 발생한 모습을 촬영한 것이다. 수정-수정 접합 공정은 수정 웨이퍼가 투명하여, 접합 불량 면적이 발생할 때, 그림 3-18-(b)와 같은 뉴턴 링

현상을 확인할 수 있다. 불량 면적은 웨이퍼 표면의 먼지 이외에, 트위징으로 인한 웨이퍼 표면의 손상으로도 발생함을 실험을 통해 확인할 수 있었다.

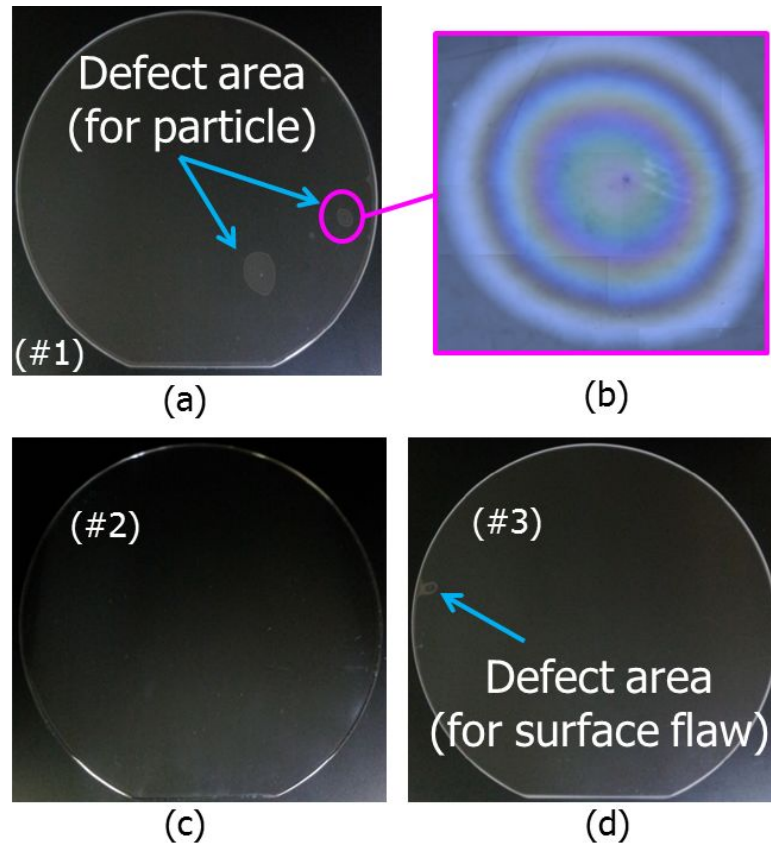


그림 3-18. QoQ 접합 공정의 재연성 실험 결과 : (a) 먼지로 인해 발생한 접합 불량(#1 번 실험), (b) 접합 불량영역에서 관찰된 Newton-ring 모습, (c) 접합불량 없이 완벽히 접합 결과(#2 실험), (d) tweezing 시 발생한 표면 결함에 의한 접합 불량(#3 실험)

아래의 표는 4 회의 재연성 실험을 정리한 표이다.

표 3-3. 재연성 실험 정리표

#	성공 여부	접합 면적 [mm <sup>2</sup> ]	불량 면적 [mm <sup>2</sup> ]	접합면적 비율 (%)
1	O	250	7604	96.8
2	O	0	7854	100.0
3	O	29	7825	99.6
4	O	43	7811	99.4

위의 표 3-3 에서와 같이 4 회의 접합 실험 모두 성공적으로 접합이 이루어졌으며, 접합 면적의 비율은 평균 97 % 이상의 값을 보였다.

## 제 4 장 비정질 수정의 건식 식각

### 4.1 수정 건식 식각에 대한 문헌조사

일반적으로 실리콘 웨이퍼의 이방성 식각에 주로 사용되는 일반적으로 잘 알려진 실리콘이나 실리콘 산화막 등의 RIE 에 비해 silica-based glass, Pyrex glass, PZT 와 같은 다른 레벨의 불순물을 포함하고 있는 물질들의 RIE 는 느린 식각 속도와 낮은 마스크 선택비와 같은 문제점들이 존재하는 것으로 알려져 있다. 유리 계열 물질들의 RIE 에 대해서도 다양한 연구 논문들이 발표되었다. Leech 등은  $\text{CF}_4/\text{CHF}_3$  를 사용한 quartz glass 및 silica-based glass 의 식각을 행하였으며 이 때 식각 속도는 100 nm/min 이하로 나타났다 [36]. Glass(soda-lime glass)의 경우  $\text{CHF}_3/\text{Ar}$ ,  $\text{CF}_4/\text{O}_2$ ,  $\text{CF}_4/\text{Ar}$  등의 가스 조성으로 식각을 수행한 예가 있으며 이 때 식각 속도는 10 nm/min 정도였다 [37].

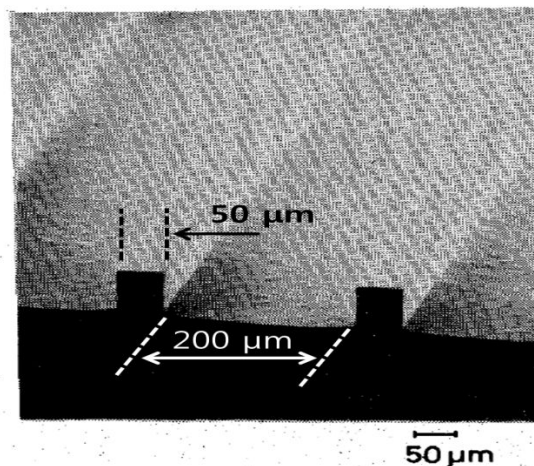


그림 4-1. Si 마스크를 이용한 수정 이방성 식각 [38]

그림 4-1 에서와 같이 수정 기판을 수  $\mu\text{m}$  이상의 깊이의 트렌치(trench) 형태로 식각하기 위한 노력 역시 이루어졌는데, 깊게는 30~50  $\mu\text{m}$  깊이의 트렌치를 알루미늄, 감광막, 티타늄(titanium), 실리콘 등의 마스크를 사용하고  $\text{CHF}_3/\text{O}_2$ ,  $\text{C}_2\text{F}_6/\text{C}_2\text{H}_4$  등의 가스 조성을 사용하여 식각한 결과가 보고되었다 [38, 39]. 그러나 위와 같은 일반적 RIE 공정을 이용한 수정 가공 방법은 본 연구에서 필요한 MEMS 공진자 구조물 구현에 적용하기가 쉽지 않다. 일반적으로 MEMS 센서는 구동력 및 감도 등의 향상을 위해 일반적으로 고종횡비의 수직 단면을 가지는 이방성 구조의 제작 기술이 요구되는데, 일반 RIE 는 식각 속도 및 마스크 선택도 등에서 제한이 있다. 위의 수정 기판 RIE 의 경우 식각 속도는 500~900  $\text{\AA}/\text{min}$  정도로 수십  $\mu\text{m}$  이상 두께의 구조물 형성을 위해서는 시간이 오래 걸리며, 마스크 재료의 선정에 주의를 기울여야 하고 동시에 마스크의 두께도 매우 두꺼워야 한다.

그러나 최근 ICP(inductively-coupled plasma)-RIE 등을 이용한 DRIE(deep reactive ion etching) 기술이 발달함에 따라 식각 속도를 높이면서도 구조물의 수직도가 유지되는 고종횡비 구조 구현이 용이한 식각 방법에 개발되었다. 따라서 이러한 quartz DRIE 기술을 이용하여 MEMS 자이로 센서 구현에 필요한 수준의 미세 가공을 충분히 달성할 수 있으리라고 판단한다. 일본 동북대의 Esashi 교수 연구팀에서는 ICP 플라즈마 소스를 사용하고 플라즈마 안정화를 위한 강력한 Sm-Co 자석을 이용하여 고밀도의 플라즈마를 생성시켜 이를 수정 식각에 이용하였다 [40, 41]. 사용한 가스는  $\text{SF}_6/\text{Xe}$  혹은  $\text{SF}_6/\text{Ar}$  시스템을 이용하였으며, 확립된 조건 하에서 유리 기판 및 수정 기판의 식각 속도는 0.6 ~ 1  $\mu\text{m}/\text{min}$  에 이르는 빠른 속도를 얻을 수 있었으며, 가스 조성 비율 및 분압 등의 공정 패러미터의 변화를 통해서 깨끗한 식각 단면 및 바닥면을 형성할 수 있었다. 그림 4-2 (a)와 (b)에는 각각



pyrex glass 기판을 DRIE 식각한 결과와, quartz DRIE 를 이용해 QCM(quartz crystal microbalance) 디바이스를 구현한 결과를 보여주고 있다.

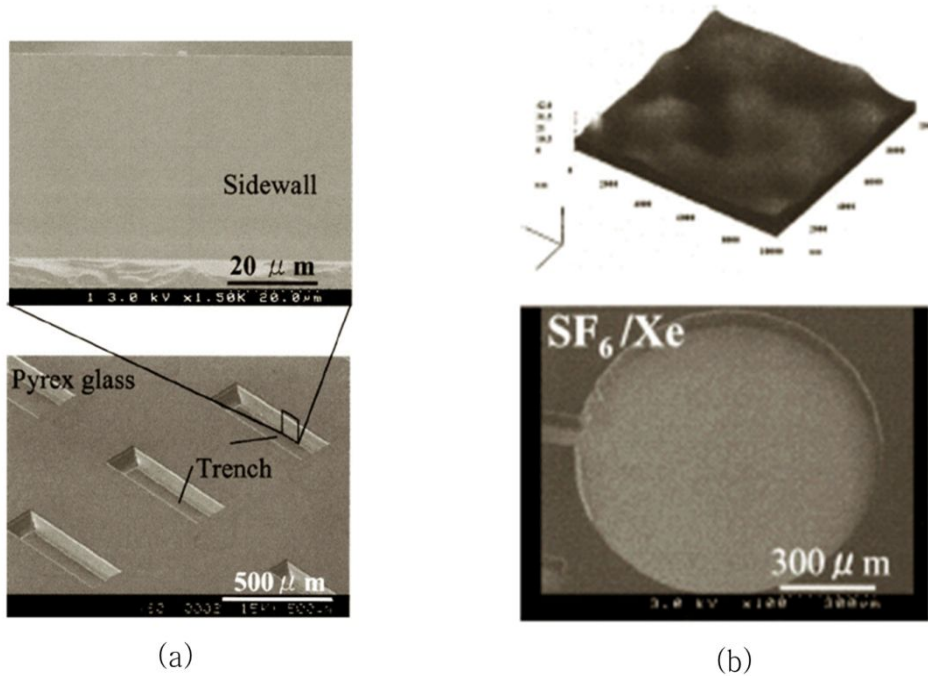


그림 4-2. DRIE 를 이용한 미세 가공 예: (a) Pyrex glass 의 DRIE 식각 예, (b) AT-cut quartz 의 DRIE 공정을 이용해 제작된 QCM(quartz crystal microbalance) 소자.

이와 같은 SiO<sub>2</sub> DRIE 장비들은 Alcatel, STS 와 같은 주요 플라즈마 장비 업체에서도 개발 노력이 진행되고 있다. 그림 4-3 은 STS 의 AOE(advanced oxide etch) 시스템의 식각방법과 이 시스템을 사용하여 수행된 식각 결과들을 보여주고 있다 [42]. STS 사의 AOE 장비의 공정 메카니즘은 Si deep etching 시의 폴리머 증착과 폴리머 식각, 실리콘

식각이 반복되는 보쉬 공정과는 달리  $C_xF_y$  계열의 폴리머를 계속해서 증착을 하게 된다. 이 때, heavy ion 에 의해서  $C_xF_y$  계열 폴리머의 결합이 깨지게 되고, 동시에 oxide 도 식각이 되게 된다. 공정 시 이방성 형상의 조절은 RF bias 와 압력 조건에 의해서 결정되게 된다. 이런 방식 때문에 실리콘을 식각하는 보쉬 공정에 비해 식각 속도는 약  $0.54 \mu\text{m}/\text{min}$  정도로 느리다.

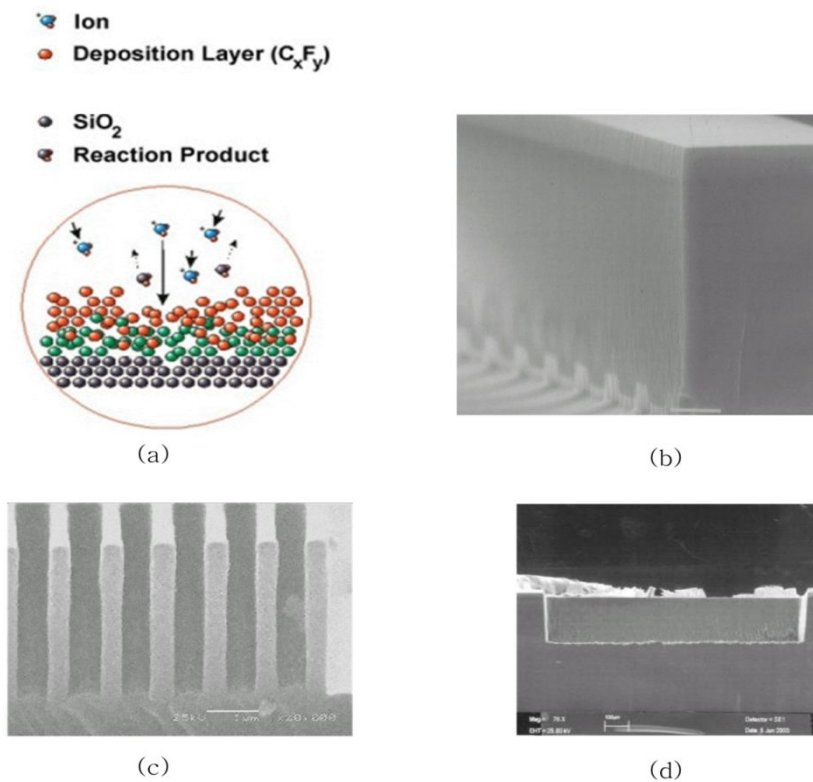


그림 4-3. STS 의 AOE(advanced oxide etch) 장비를 사용한  $SiO_2$  가공 방법 및 예 : (a) 식각 방법 (b)  $40 \mu\text{m}$  두께의 산화막 식각 프로파일. (c)  $0.3 \mu\text{m}$  선폭의 산화막 고종횡비 식각 예. (d) 관통 식각 recipe 를 이용한 수정 웨이퍼의 식각 예.

아래 표 4-1 은 지금까지의 문헌조사를 통해 얻은 SiO<sub>2</sub> 건식 식각 공정을 정리 할 수 있었다.

표 4 - 1. SiO<sub>2</sub> DRIE 공정

	Leech et al.	David T. Chang et al.	Esashi Lab.	STS	ADIXEN
Pressure (Pa)	6 x 10 <sup>-5</sup>	2 mTorr	0.2 Pa	1~100 mTorr	0.5 Pa
Bias voltage (V)	—	-360	-390	—	—
Gas (sccm)	CF <sub>4</sub> (25 sccm)	CF <sub>4</sub> (20 sccm) O <sub>2</sub> (20 sccm)	SF <sub>6</sub> , Xe	CF <sub>2</sub> , CF <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> F <sub>8</sub>
RF power (W)	80 ~ 550	—	—	1000	2800
Etch mask	Cr (0.1 μm)	PR	Ni	Cr	Al (6 μm) Si (40 μm) Al (10:1) Si (15:1)
Selectivity	—	~1	—	15:1	
Etch time	0.8 nm/min	0.1 μm/min	0.4 μm/min	0.54 μm/min	—
Aspect ratio	0.25	—	—	12	—
Application	—	Quartz Resonator	QCM	—	—
Reporting year	1999	2003	2003	2008	2005

## 4.2 수정 건식 식각 메커니즘

$\text{SiO}_2$ 의 이방성 식각 반응은 단계의 구분 없이 잘 혼합된 식각 가스의 플라즈마 상태가 유지되는 동안 이온 도움에 의한 식각으로 설명된다. A. Sankaran 등이 설명한 수정물질의 건식 식각 메커니즘을 도시하면 그림 4-4와 같다 [43, 44].

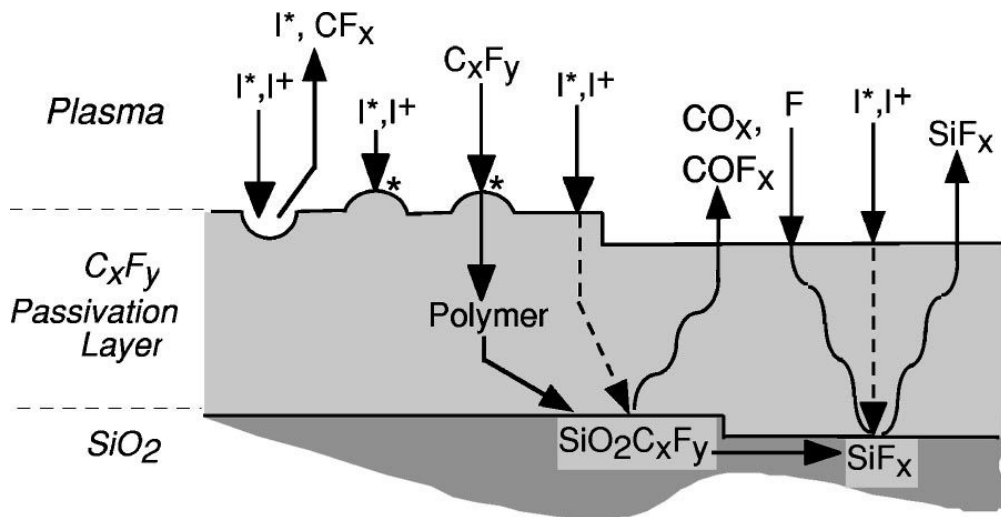
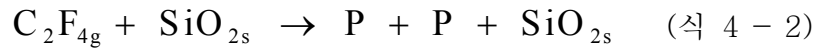
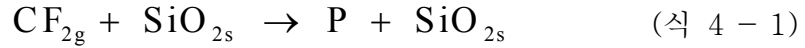


그림 4-4. 탄화불소 플라즈마에 의한 수정 식각 (I+: 이온 flux, I\*: hot neutrals, 점선 : 폴리머층으로의 에너지 전달, 곡선 : 폴리머층으로의 반응기 확산) [43]

수정의 건식 식각은 실리콘 산화막층 위의  $\text{C}_x\text{F}_y$ 의 고분자층에서 복잡합 표면 반응에 의해 이루어지게 된다 [44]. 앞으로 (1)~(4)의 과정으로 구분지어 서술할 내용은 시간적 단계를 거치는 것이 아닌  $\text{SiO}_2$ 의 표면 혹은 폴리머 층에서 동시에 이루어지는 식각의 과정임을 염두에 두길 바란다.

(1) 식 4-1, 식 4-2 와 같이 탄화불소의 플라즈마 상태에서 만들어진 고분자 반응기( $C_xF_y$ )가  $SiO_2$  표면에 폴리머 층을 형성한다.



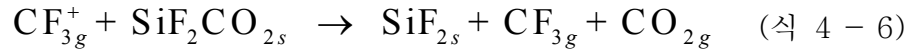
(2) 이와 동시에 저준위 이온들의 충격(bombardment)으로부터 에너지를 받는 폴리머 층은 다른 라디칼 분자들의 흡착을 유도하여 폴리머 층이 두꺼워진다.



(3) 고준위 이온 혹은 반응성이 높은 F 계열 라디칼 원자에 의한 폴리머 층의 물리적 식각이 이루어지게 된다. 이 과정에서 폴리머층이 얇아지면, 이온 및 라디칼 이온의 운동에너지가 공급된다.



(4) 이때 공급된 운동에너지는 폴리머 층과  $SiO_2$  층에서 화학반응에 의한 표면 식각이 이루어지게 된다. 임연호 등은 이를 ‘이온 도움에 화학적 스퍼터링’으로 규정하였다 [44].



특히 식각과 증착이 동시에 이루어지는 (2),(3)의 과정에서는 식각 가스의 유량, RF power 의 크기, 압력 과 같은 변수에 의하여, 폴리머 층은 점점 얇아지기도 하고, 두꺼워 지기도 하는데, 적절한 균형이 맞추어지면 일정한 두께를 유지하게 된다. 이때, 폴리머 층이 너무 두꺼워지면 운동에너지의 공급이 작아져 식각율이 하락하고, 너무 얇아지면 반대로 식각율이 상승하게되나 폴리머층이 없어져 왜곡된 식각이 이루어 질 수 있다. 따라서 원활한 식각을 위해서는 적절한 폴리머 층의 두께를 이룰수 있도록 식각 가스의 유량, RF power 등의 조건을 조절할 필요가 있다.

## 4.3 수정 건식 식각의 마스크 및 식각 실험

### 4.3.1 여러가지 식각 마스크의 문헌들

수정의 건식 식각의 속도는 약  $0.5 \sim 1 \mu\text{m}/\text{min}$  으로 수십  $\mu\text{m}/\text{min}$  의 bosch 공정의 식각 속도보다  $1/5 \sim 1/10$  정도의 수준에 머무르고 있다 [45, 46]. 따라서 깊이  $1 : 5 \sim 1 : 10$  이상의 고종횡비 구조물을 제작하기 위해서는  $\text{SiO}_2$  와의 선택비를 고려하여 적절한 마스크를 설정해야한다. 그 동안 많은 연구 그룹들이  $\text{SiO}_2$  의 고종횡비 구조물을 제작하기 위하여 감광제(SU-8 등 thick PR), 금속(Al, Ni, Cr 등), Si(단결정 혹은 폴리실리콘)등 여러가지 마스크를 사용하여 건식 식각 실험을 진행해왔다 [47-52].

여러가지 마스크에 대한 식각 내용을 정리하면 다음과 같다. 표 4-2 에서 보는 바와 같이,  $\text{SiO}_2$  물질에 대한 선택비는 금속 계열의 물질이 40~50 수준으로 분포함을 알 수 있으며, 실리콘 계열의 선택비 또한 10~20 수준으로 형성됨을 확인 할 수 있다. 감광제의 경우 오히려 1 미만의 값을 갖는 것으로 보아  $\text{SiO}_2$  혹은 수정 구조물의 건식 식각에 사용하지 않는 것이 좋을 것으로 판단된다 [50].

하지만 각 논문의 실험 패턴의 크기가 다르고, 식각 깊이 또한  $0.3 \sim 50 \mu\text{m}$  로서 표에서의 비교 값을 통해 단순히 마스크를 선택하는 것은 무리가 있다. 본 논문에서 제시하는 수정 웨이퍼 패턴에서 구조물과 구조물 사이의 간격은 약  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  로서, 문헌상의 식각을 보다 작을 것으로 판단된다. 이를 볼 때, 같은 깊이를 식각 하더라도 문헌상의 식각 시간 보다 더 많은 시간이 소요될 것이므로, 더욱 두껍고, 적은 측면 손실 (side-wall etch) 조건을 만족시키는

마스크가 요구된다.

표 4-2. 마스크 별 식각 특징

마스크		식각물질	마스크 두께 ( $\mu\text{m}$ )	선택비 (식각물질/ 마스크)	식각 깊이 ( $\mu\text{m}$ )
감광제 계열	SU-8	Fused quartz	90	0.15	30
	SPR- 220	SiO <sub>2</sub>	—	2:1	6
실리콘 계열	SiN	SiO <sub>2</sub>	—	8:1	2
	Si	SiO <sub>2</sub>	—	13:1	6
금속 계열	Ni	Quartz	4 ~ 5	40:1	50
	Al	SiO <sub>2</sub>	0.8	—	10
	Cr	Fused quartz	0.07	50:1	0.3



#### 4.3.2 실리콘 마스크를 활용한 수정 공진자의 제작 실험

문헌상의 조사에 의하면, 대부분의 경우 수정 웨이퍼의 건식 식각 속도는  $0.5 \mu\text{m}/\text{min} \sim 1 \mu\text{m}/\text{min}$  의 범위를 벗어나지 않는 것으로 보고되고 있다. 때문에 고종횡비의 구조물을 식각하기 위해서 선택비가 높은 마스크를 이용해야 한다. 실리콘 마스크의 경우 실리콘 웨이퍼의 패터닝을 통해 자유로운 마스크를 제작할 수 있고, 선택비에 따라 마스크의 높이 조절이 용이하다는 장점이 있다 [51].

##### 4.3.2.1 단결정 실리콘 웨이퍼 마스크

단결정 실리콘 웨이퍼를 수정 웨이퍼의 식각을 위한 마스크로서 이용하고자 그림 4-5 와 같은 공정을 통해 수정 공진자의 제작 실험을 진행하였다.

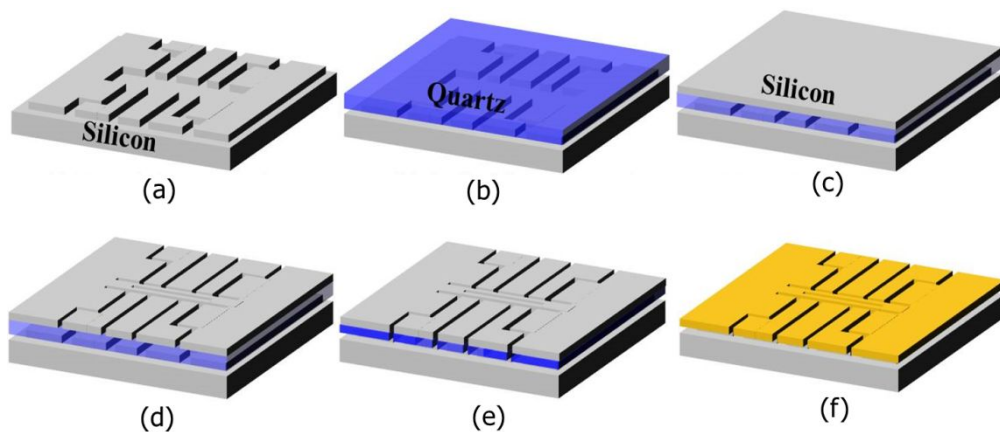


그림 4-5. 단결정 실리콘 마스크를 활용한 수정 공진자 제작 공정

공정 과정을 설명하면 다음과 같다. 먼저 실리콘 기판 위에 수정 구조물의 움푹임을 확보할 수 있는 공동(cavity)을 실리콘 DRIE

공정으로 형성한다 (a). SOQ 접합 공정과 박막화를 거쳐  $40\ \mu\text{m}$  두께의 구조물 층을 마련한다 (b). SOQ 접합 공정과 박막화를 통해 수정 식각을 위한 실리콘 마스크를 형성하고 마스크를 패터닝 한다 (c,d) . 수정을 식각하여 진동자를 형성하고 (e), 남아있는 실리콘 마스크 층을 제거하고, 정전력 구동을 위해 전면에 금속 층(Ti/Au)을 스퍼터 장비를 이용하여 증착한다 (f).

위의 공정 방법을 통해 제작된 진동자는 그림 4-6 와 같이 웨이퍼 단위 공정을 통해 제작되었으며 수정 외팔보 및 DETF 구조물을 제작 할 수 있었다.

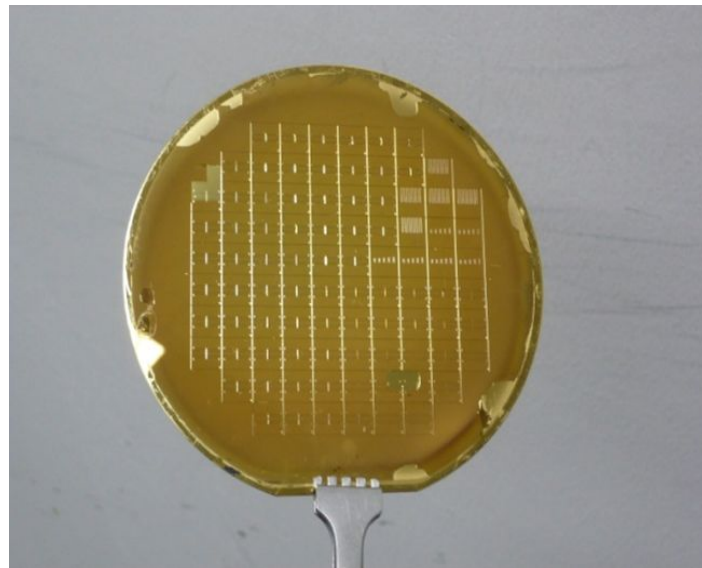


그림 4-6. 단결정 실리콘 마스크를 활용한 웨이퍼 레벨 수정 공진자 제작 결과.

그림 4-7 과 그림 4-8 은 제작된 수정 외팔보 (cantilever) 구조물과 양팔보 소리굽쇠(double-ended tuning fork) 구조물을 촬영한 결과이다. 각 그림에서의 확대 부분을 보면 수정 구조물을 부양하기 위한 실리콘

기관 부분의 공동(cavity)이가 형성되어 있는 모습을 볼 수 있다. 이러한 공동은 진동자 구조물의 부양과 더불어 진동자와 양옆에 있는 전극이 스퍼터 공정 이후에도 절연되게 만드는 효과가 있다.

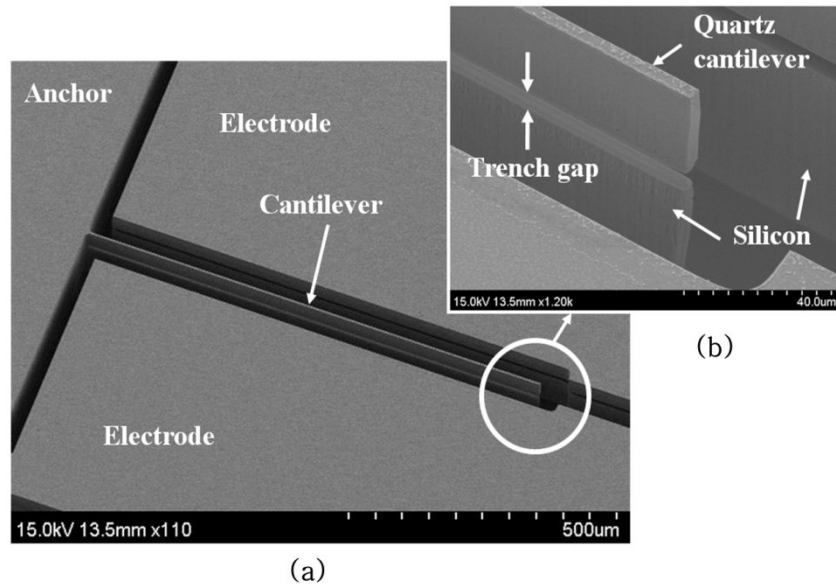


그림 4 - 7. 단결정 실리콘 마스크로 제작된 외팔보 공진자 : (a) 외팔보와 전극의 모습, (b) 건식 식각 이후 부양된 모습

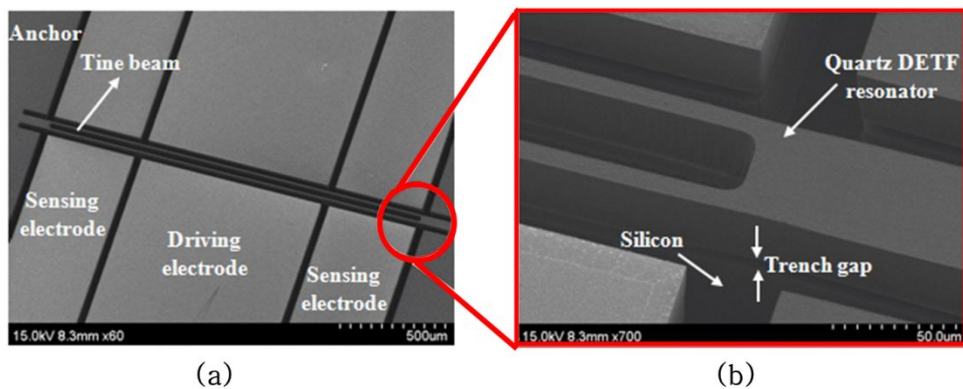


그림 4 - 8. 단결정 실리콘 마스크로 제작된 DETF 공진자 : (a) DETF 공진자와 전극의 모습, (b) 건식 식각 이후 부양된 모습

제작된 수정 구조물은 수정 건식 식각 시에 발생하는 측면 식각으로 인해  $20\ \mu\text{m}$  로 디자인된 빔의 선포이  $15\ \mu\text{m}$  로 제작되어  $5\ \mu\text{m}$  의 선포 감소 양상을 보였다. 이러한 선포 감소 양상은 수정 건식 식각 시 발생하는 측면 손실과 실리콘 마스크의 footing 현상으로 인한 공정 오차로 판단되었다.

비정질 수정 웨이퍼와 접합된 단결정 실리콘을 마스크로 활용하는 경우, 실리콘 마스크를 패터닝 하는 공정 중에 그림 4-9 와 같이 footing 으로 인한 실리콘 구조물의 왜곡이 발생하게 되었다. 이렇게 왜곡된 Si 마스크는 수정 건식 식각 시 그대로 수정 구조물에 전사되어 측면 손실을 초래하였다.

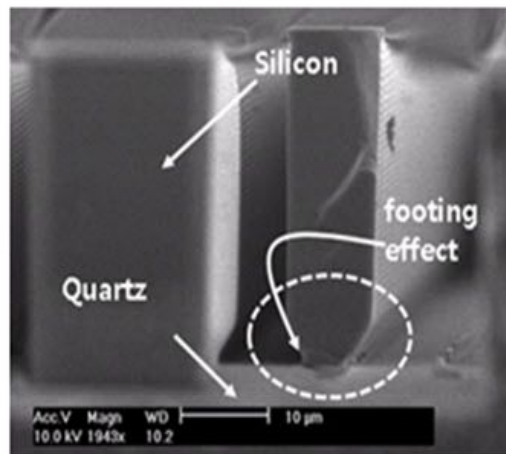


그림 4 - 9. 단결정 실리콘 마스크의 Footing 현상

때문에, footing 으로 인한 마스크의 손실을 개선하기 위하여, 단결정 실리콘이 아닌 SOI 웨이퍼를 마스크로 활용하고자 하였다.

#### 4.3.2.2 SOI 웨이퍼 마스크

단결정 실리콘 마스크 패턴 시 발생하는 footing 현상을 해결하기 위하여 그림 4-10의 공정을 통하여 SOI wafer의 구조물 층을 수정 건식 식각의 마스크로 사용하였다.

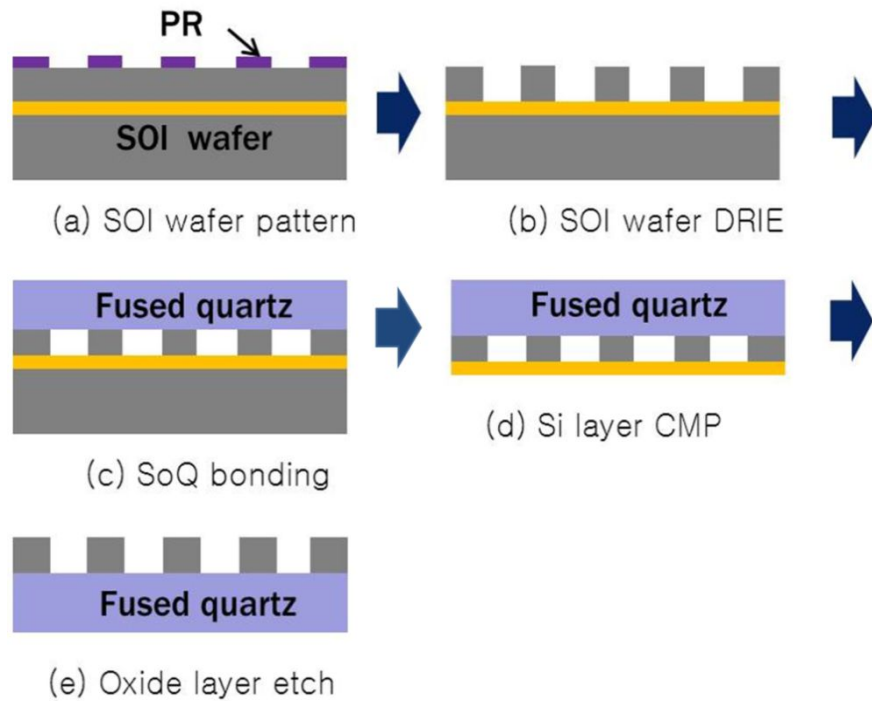


그림 4 - 10. SOI 웨이퍼를 활용한 Si 마스크 제작 공정 순서

위의 공정 방법을 설명하면 다음과 같다. 먼저 SOI wafer 의 device layer 부분을 mask 로 사용하기 위하여 PR 패턴 및 Si-DRIE 공정을 실시하게 된다. 물론 SOI wafer 의 box layer 또한 SiO<sub>2</sub> 로 이루어져 있기 때문에 Si-DRIE 과정에서 footing 이 발생할 수도 있다. 그러나, 그림 4-10-d. 그림 4-10-e 와 같이 실리콘/수정 접합과정에서 Si 마스크의 위, 아래가 바뀌게 되므로

footing 으로 인한 마스크의 왜곡이 개선될 수 있다. 아래 그림 4-11 은 위의 SOI 공정을 통해 구현된 쿼츠 위의 실리콘 마스크의 모습을 보여준다. 그림에서도 볼 수 있듯이 실리콘과 수정의 접합면에서 왜곡이 전혀 발생하지 않았음을 확인할 수 있었다.

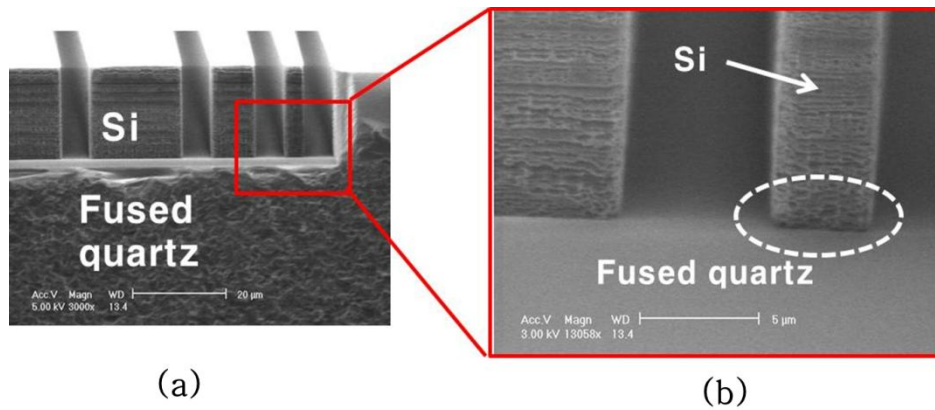
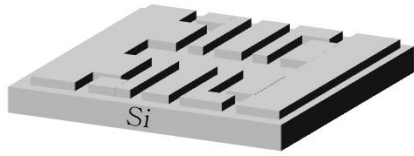


그림 4-11. SOI 웨이퍼를 활용한 Si 마스크 제작 결과 : (a) 비정질 수정과 접합이 이루어진 Si 마스크 패턴, (b) 개선된 footing 현상 (점선 안쪽의 Si 마스크)

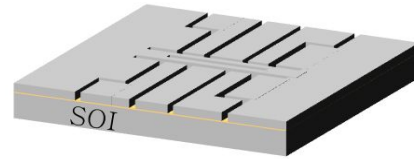
#### 4.3.2.3 SOI 웨이퍼 마스크를 활용한 수정 공진자 제작 실험

SOI wafer 를 마스크를 이용하여 DETF 공진자를 제작 시 그림 4-12 와 같은 공정 순서를 거쳐 제작하였다. 먼저 단결정 실리콘 웨이퍼 (SSP)에 제작 될 수정 DETF 가 움직일 수 있는 cavity 를 실리콘 DRIE 를 이용하여 형성한다 (a). SOI 웨이퍼의 구조물(두께 20  $\mu\text{m}$ ) 층에 마스크를 형성한다 (b). 비정질 수정 웨이퍼와 SOI 웨이퍼를 SoQ 접합한 후 (c), CMP 공정을 이용하여 비정질 수정 웨이퍼의 구조물의 두께를 형성한다 (d). CMP 처리된 얇은 수정 웨이퍼에 먼저 제작된

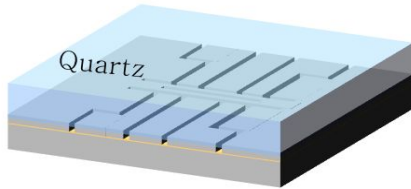
Cavity 웨이퍼를 SoQ 접합한 후 (e), 반대면의 SOI 웨이퍼의 handling layer 와 oxide layer 를 제거한다 (f,g). 이후 남게 되는 Quartz wafer 와 Si mask 패턴으로 Quartz DRIE 를 실시하여 device 를 제작한다 (h). 마지막으로 Si mask 층을 제거하고, DETF 위에 전극을 마련하기 위해 sputtering 으로 Cr/Au coating 을 실시한다 (i).



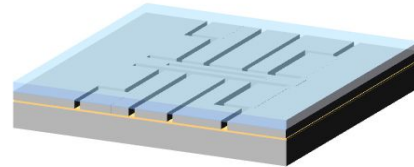
(a) Cavity layer (DRIE)



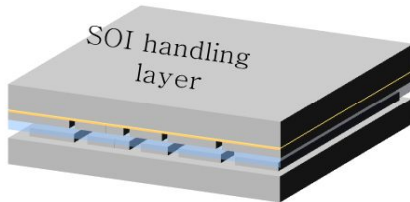
(b) Quartz DRIE mask layer  
(SOI DRIE)



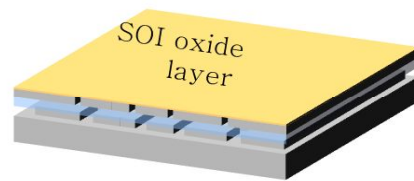
(c) 1<sup>st</sup> SOQ 접합 (Quartz & SOI)



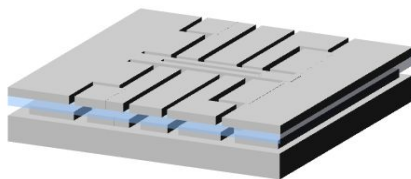
(d) Quartz CMP (device layer)



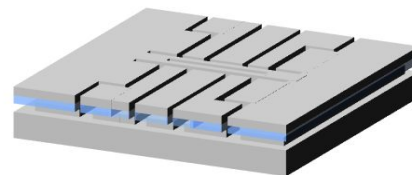
(e) 2<sup>nd</sup> SOQ 접합  
(1<sup>st</sup> SOQ & cavity layer)



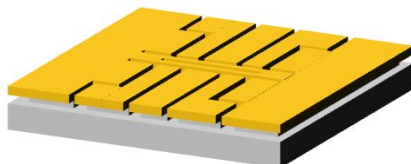
(f) SOI handling layer 제거



(g) SOI oxide layer 제거



(h) Quartz DRIE



(i) Cr/Au sputtering

그림 4-12. SOI 마스크를 활용한 수정 공진자 제작 공정



#### 4.3.2.4 SOI 웨이퍼 마스크를 활용한 수정 공진자 제작 결과

SOI wafer 를 식각 마스크로 사용한 DETF 공진자의 제작 실험의 결과는 그림 4-13 을 통해 확인 할 수 있었다. 우선 비정질 수정의 건식 식각 가스 조성비는  $C_4F_8$  와 He 가스를 각각 40 : 10 (sccm) 으로 하였으며, RF power 는 300 W, 식각 시간은 120 분으로 하였다.

그림 4-13 에서 보이는 바와 같이 DETF 의 tine 윗부분이 점점 좁아진 왜곡된 구조물이 관찰 되었으며, cavity layer 와 약  $10\ \mu\text{m}$  가량의 정렬 오차가 발생하였음을 볼 수 있었다. 식각 시간은 구조물의 릴리즈를 위하여  $40\ \mu\text{m}$  깊이의 수정구조물 식각에 소요되는 100 분 보다 20 분 더 DRIE 시간을 길게 하였음에도 불구하고, etch 가 충분히 진행되지 못하여 구조물이 부양되지 못한 모습을 볼 수 있었다.

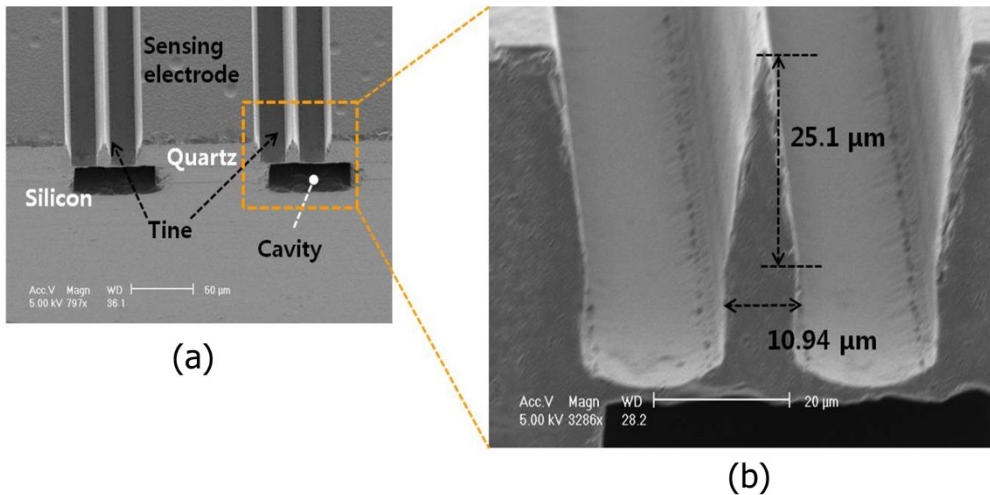


그림 4-13. 제작된 DETF 수정 공진자(SOI 마스크) : (a) DETF 공진자 단면, (b) 공진자의 tine 부분 확대 사진

이는 식각이 진행되어 구조물의 깊이가 깊어짐에 따라 식각에 관여하는 ion 및 radical 들의 침투가 원활하지 못하여, 식각율이 떨어진 원인이 있었기 때문이며, 실리콘 마스크를 이용할 때, 발생하던 마스크의 측면 손실이 과도하게 일어났기 때문으로 판단되었다. 왜곡된 Si 마스크의 패턴은 비정질 수정 DETF 구조물에 전사되고 결과적으로 마스크와 같이 왜곡된 수정 구조물의 단면을 관찰할 수 있었다. 이러한 실리콘 마스크의 식각 다른 문헌에도 같이 발생하는 것으로 보고되고 있다 [53]. DETF 구조물의 왜곡된 식각 과정을 모식도로 나타내면 그림 4-14 와 같다.

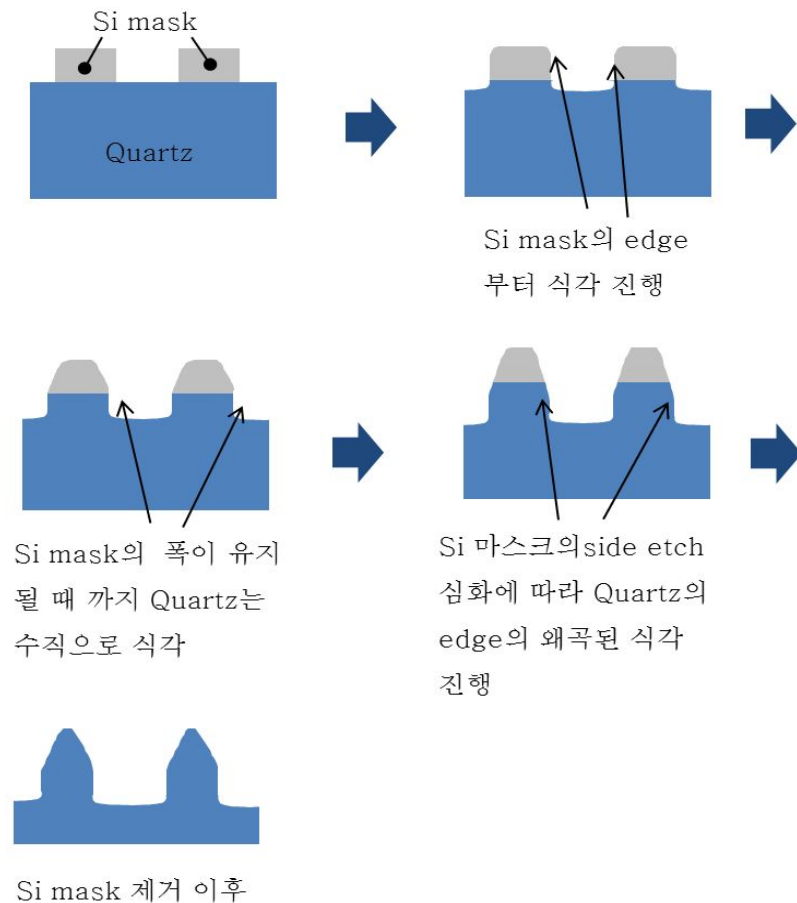


그림 4-14. 수정 구조물 왜곡 식각의 모식도

따라서 Quartz DRIE 시 가급적 영향을 적게 받는 metal mask 를 이용하여 수정 정밀 고종횡비 식각 조건을 실험할 필요가 대두되었다.

#### 4.3.3 Ni 마스크를 활용한 수정 공진자의 제작 실험

단결정 실리콘 웨이퍼를 마스크로 활용하는 실험에서는 마스크의 측면 부식이라는 문제점 때문에, 실리콘보다 높은 선택비를 갖는 금속 계열의 마스크를 도입할 필요가 있었다. 문헌상으로 알아본 금속 계열 마스크의 선택비는 물질마다 다르지만, 약 40~50 에서 형성되었으므로, 도금을 통해 약 1~1.5  $\mu\text{m}$  의 높이를 갖는 Ni 마스크를 선택하였다.

##### 4.3.3.1 Ni 도금

Ni 마스크의 도금 몰드 패턴과 도금 결과의 모습은 그림 4-15 와 그림 4-16 을 통해 확인 할 수 있었다.

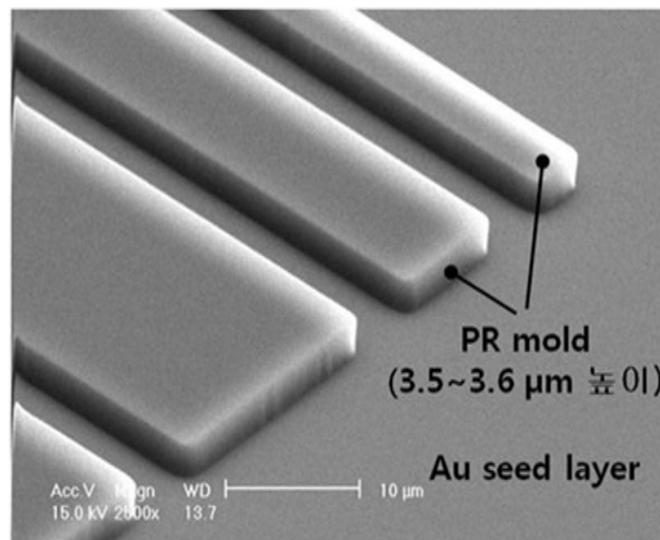


그림 4-15. 도금 몰드 패턴 (감광제 : DNR L-300)

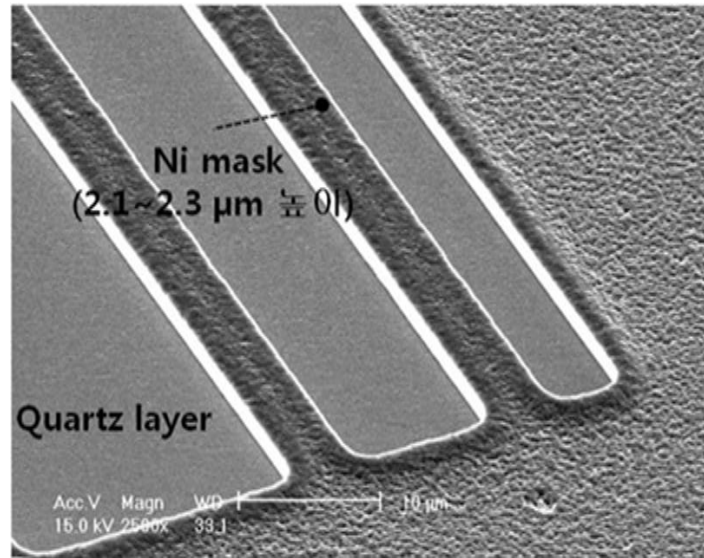


그림 4-16. Ni 도금 결과

문헌상으로 확인된 비정질 수정의 식각율은 약  $0.5 \sim 1.0 \mu\text{m}/\text{min}$  이므로 이를 감안하여, Ni 도금의 높이를 약  $1.5 \sim 2 \mu\text{m}$  로 설정하였다. 도금 몰드는 negative PR(DNR L-300)을 사용하여  $3.5 \sim 3.6 \mu\text{m}$  높이로 형성하였다. 그림 4-16 은 Ni 도금 이후 감광제가 제거된  $5 \mu\text{m}$  선폭의 SEM 사진이다. Ni 도금의 형성 모습에서, 결정 크기가 다소 크고, 측면 부분에서 edge-bid 와 비슷하게 약간 튀어나온 모습을 확인할 수 있었으나, Ni 마스크의 측벽이 깨끗이 형성되어 비정질 수정 건식 식각 시 마스크로 충분히 사용할 수 있으리라 판단되었다.

#### 4.3.3.2 Ni mask를 이용한 수정 식각 실험

Ni mask를 통해 그림4-17, 그림4-18 과 같이 비정질 수정 건식 식각을 진행하였다. 그림 4-17과 4-18은 각각 open width 20  $\mu\text{m}$ , 5  $\mu\text{m}$  로 패터닝된 trench 구조, 반전된 trench 구조의 식각 모습을 SEM 촬영한 것이다. 식각 이후 형성된 구조물의 옆면은 비교적 수직으로 형성된 모습을 확인 할 수 있었다. Quartz의 식각 조건은 식각 가스로서  $\text{C}_4\text{F}_8$ 과 He를 각각 20 sccm , 5 sccm 으로 투입하였으며, RF power는 300 W 로 부여 하였다. 식각 시간은 20분 썩 2회 실시하였으며, 식각 중간에 챔버의 온도가 과열되는 것을 방지하기 위해, interval time 30분을 두어 chamber의 온도가 과열되는 것을 방지하였다. 식각 깊이는 약 15.2  $\mu\text{m}$ 로 측정 되었으며, 식각율은 약 0.38  $\mu\text{m}/\text{min}$  으로 산출되었다. 식각 이후 Ni 마스크의 높이는 약 2.0  $\mu\text{m}$ 로 측정 되었으며, 비정질 수정과 Ni의 선택비는 약 75 이상 되는 것으로 판단되었다.

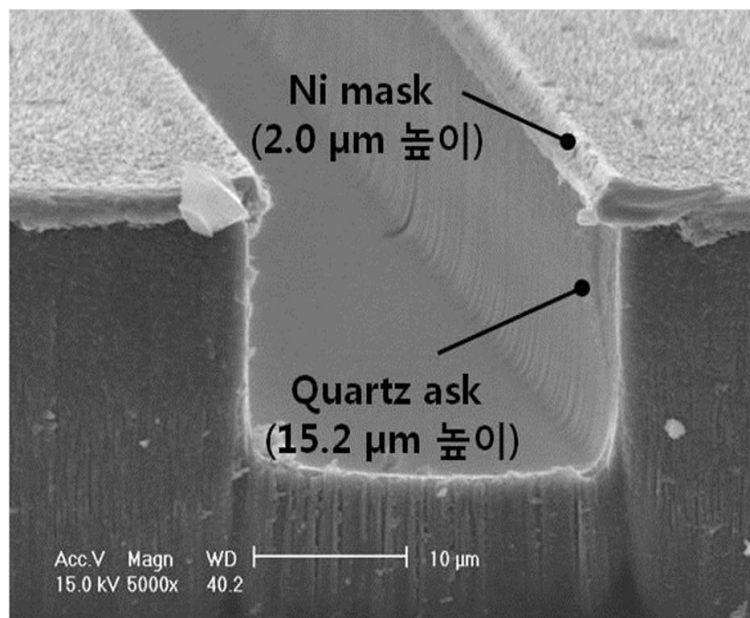


그림 4-17. 트렌치 구조 식각 결과

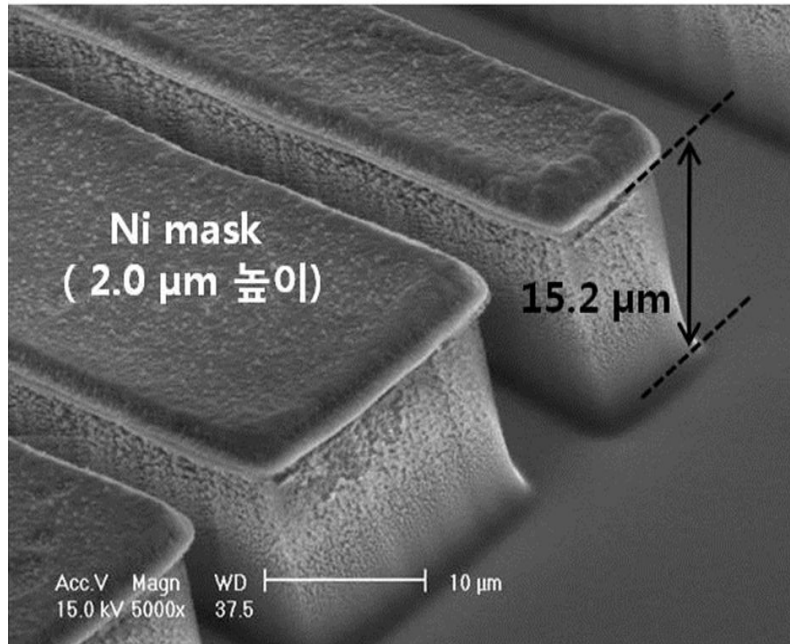


그림 4-18. 반전된 트렌치 구조 식각 결과

또한 그림 4-19 와 같이 Ni 마스크 이용 시 Si 마스크의 실험 결과와 비슷하게 side wall etch 가 발생한 것을 확인할 수 있었는데, 그 크기는 한쪽 당 약  $0.9 \mu\text{m}$  씩 줄었음을 측정할 수 있었다. 물론 Si 마스크에서의 마스크의 선폭 손실에 의한 측면 패턴의 손실보다는 적은 크기였지만, 제작될 비정질 수정 DETF 의 구조물 높이가 약  $30 \sim 40 \mu\text{m}$  임을 감안할 때, 건식 식각 시간을 증가시킬 경우 측면 손실의 크기가 더욱 증가하리라 예상되었다. 따라서 건식 식각 공정 실험을 통하여 Ni 마스크의 under-cut 의 현상을 개선할 필요가 있었다.

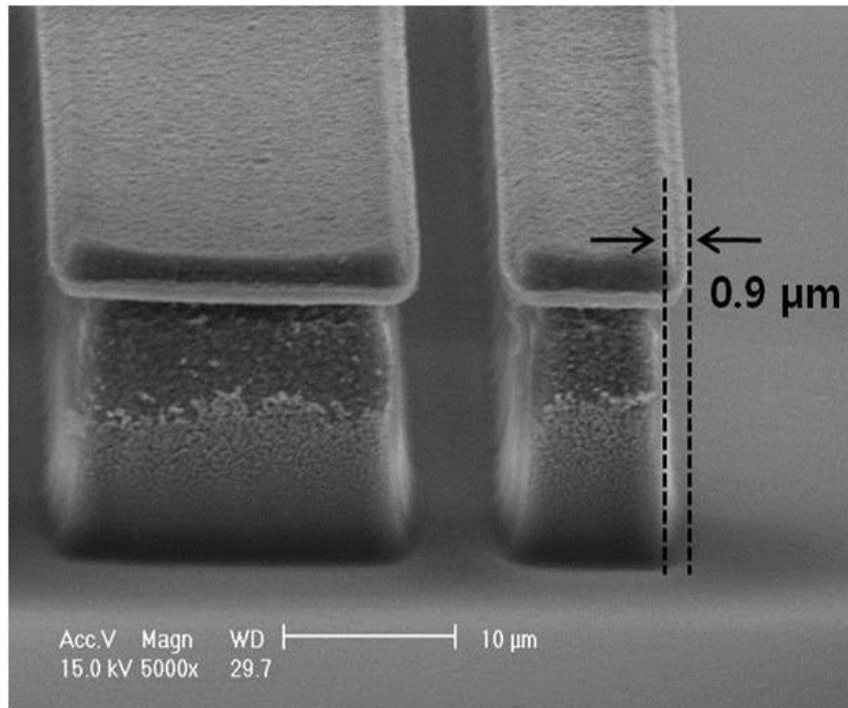


그림 4-19. Under-cut 으로 인한 측면 식각

#### 4.3.3.3 Under-cut 개선 실험

Ni mask 이용 시 발생하는 under-cut 으로 인한 측면식각이 발생하였다. 측면 식각의 발생 원인으로는 먼저 Ni 도금 패턴 형성 이후 씨앗층(Cr/Au)을 제거하는 과정에서 생길 수 있는 물리적인 마스크 패턴의 손실과 비정질 수정 건식 식각 공정 시 Ni 마스크의 패턴 가장자리 부분에 집중되는 전계로 인한 under cut 의 경우를 가정할 수 있다. 이러한 원인을 판단하기 위해 DRIE 시간을 다르게 하였을 때 형성되는 구조물의 형상을 확인하기 위해 그림 4-20, 그림 4-21 과 같이 실험 하였다.

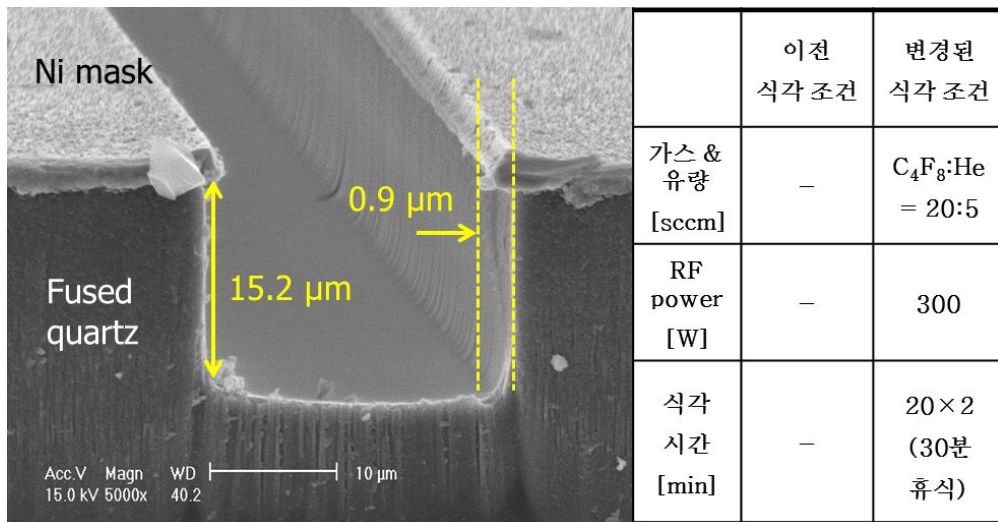


그림 4-20. 식각 시간에 따른 under-cut 개선 실험 1

그림 4-20 의 조건 실험의 결과는 아래 표 4-3 와 같이 정리되었다. Ni 마스크와 비정질 수정의 선택비는 약 1:75, 식각 깊이는 약 15.2  $\mu m$  , 측면 식각은 약 0.9  $\mu m$  로 측정 되었다.

표 4-3. Under-cut 개선 실험 1 의 결과

	선택비 (Ni : quart)	수직 식각율 [ $\mu m/min$ ]	식각 깊이 [ $\mu m$ ]	측면 식각 [ $\mu m$ ]	Under-cut [ $\mu m$ ]
이전 조건 결과	—	—	—	—	
변경된 조건 결과	1: 75	0.38	15.2	0.9	0.9

이후 같은 조건의 실험에서 식각 시간을 늘린 실험을 그림 4-21 과 같이 진행하였다.



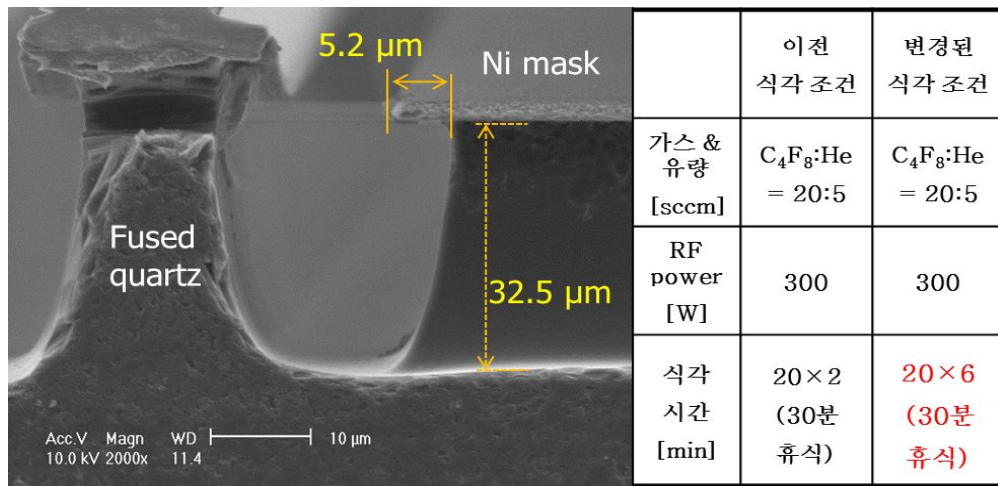


그림 4-21. 식각시간에 따른 under-cut 양상 실험 결과 2

실험 결과, 식각 시간이 길어짐에 따라 식각 깊이는 14.3  $\mu\text{m}$  에서 32.5  $\mu\text{m}$  로 깊어졌으나, 수직 식각율이 0.38  $\mu\text{m}/\text{min}$  에서 0.27  $\mu\text{m}/\text{min}$  로 줄어들게 되었다. 또한 under cut 길이의 값이 0.9  $\mu\text{m}$  에서 5.2  $\mu\text{m}$  로 증가되는 것으로 드러났다. 이러한 식각 왜곡의 원인은 under cut 의 양상이 Ni 마스크의 하단 부분에 집중되는 것으로 보아 Ni 마스크의 패터닝 시 발생할 수 있는 물리적인 패터닝 손실 보다는 주로 Ni mask 가장자리에 집중되는 전계로 인하여 식각에 관여하는 이온들이 집중되어 under-cut 이 발생하는 것으로 판단되었다.

표 4-4. Under-cut 개선 실험 2 의 결과

	선택비 (Ni : quart)	수직 식각율 [ $\mu\text{m}/\text{min}$ ]	식각 깊이 [ $\mu\text{m}$ ]	측면 식각 [ $\mu\text{m}$ ]	Under-cut [ $\mu\text{m}$ ]
이전 조건 결과	1: 75	0.38	15.2	0.9	3.4
변경된 조건 결과	1: 64	0.27	32.5	5.2	5.2

under-cut 에 의한 왜곡 현상을 줄이기 위해서는 RF power 를 늘려 수직 식각의 경향성을 강화하는 대안을 마련하여 확인 실험을 진행하였다. 또한 수정 건식 식각 시  $\text{SiO}_2$  의 화학식각을 활성화하기 위하여 식각 가스의 조성을  $\text{C}_4\text{F}_8$ , He 에서  $\text{C}_4\text{F}_8$ ,  $\text{O}_2$  의 조합으로 변경하였다. 새로운 가스 조성의 식각 실험 결과는 그림 4-22 를 통해 확인 할 수 있다.

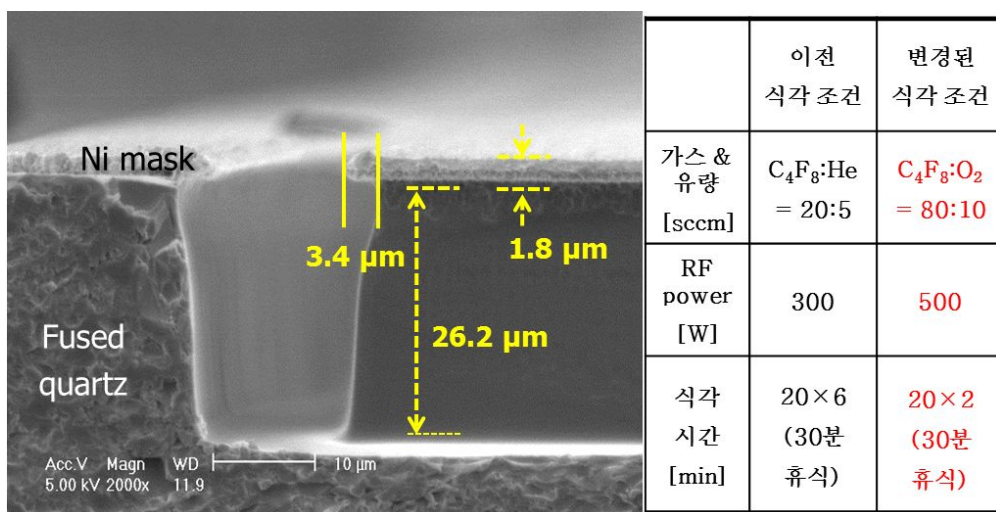


그림 4-22. 식각 가스 변경 실험 결과

그림 4-22 는 공정 조건을 다음과 같이 변화한 실험의 결과를 보여주고 있다. 먼저 etch gas 의 조성을  $\text{C}_4\text{F}_8 : \text{O}_2 = 80 : 10$  (sccm) 으로 변화하였으며, RF power 를 500 W 로 인가하였다. etch 시간은 40 분으로 20 분씩 2 번 나누어 진행되었으며, 앞의 경우와 마찬가지로 chamber 의 과열을 방지하기 위해 30 분의 휴식 시간을 주었다.

실험 결과, 식각 깊이는 26  $\mu\text{m}$  로 깊어졌으며, 수직 식각율 또한 0.36  $\mu\text{m}/\text{min}$  에서 0.64  $\mu\text{m}/\text{min}$  으로 증가하였다. 이러한 수직 식각율의 증가는 40  $\mu\text{m}$  이상의 구조물 식각을 가능케 할 것으로 판단되었으나,

undercut 의 양상은 0.9  $\mu\text{m}$  에서 약 3.5  $\mu\text{m}$  정도로 오히려 늘었음을 확인할 수 있었다.

표 4-5. 식각 가스 변경 실험 결과

	선택비 (Ni : quart)	수직 식각율 [ $\mu\text{m}/\text{min}$ ]	식각 깊이 [ $\mu\text{m}$ ]	측면 식각 [ $\mu\text{m}$ ]	Under-cut [ $\mu\text{m}$ ]
이전 조건 결과	1: 75	0.38	15.2	0.9	0.9
변경된 조건 결과	1: 65	0.64	26.2	—	3.4

이는 RF power 를 증가시킴에 따라 인가되는 전계의 세기도 증가하여, under cut 의 양상이 같이 증가된 결과로 보인다. 결과적으로 볼 때, 수직 식각의 경향은 향상되었으나, under-cut 의 문제는 근본적으로 해결되지 못한 것으로 판단되었다.

Under-cut 현상의 문제를 완화하고, 측면 식각양상을 줄이기 위해 수정 건식 식각 사이에 RF bias power 를 0W 로 조절하여  $\text{C}_4\text{F}_8$  gas 만을 흘려줌으로써, 수정 구조물 표면에 polymer 의 두께를 두껍게 만들어 under-cut 의 양상을 완화하는 실험을 그림 4-23 과 같이 진행하였다. 그 결과 그림 4-23 과 같이, 측면 식각의 양상을 40  $\mu\text{m}$  의 수정구조물을 식각할 때, 약 3  $\mu\text{m}$  정도로 줄일 수 있는 효과를 확인하였다. 따라서 구조물의 깊이를 20  $\mu\text{m}$  의 수준으로 할 경우, 측면 식각을 1~ 1.5  $\mu\text{m}$  의 수준으로 줄일 수 있는 가능성을 확인하였다.

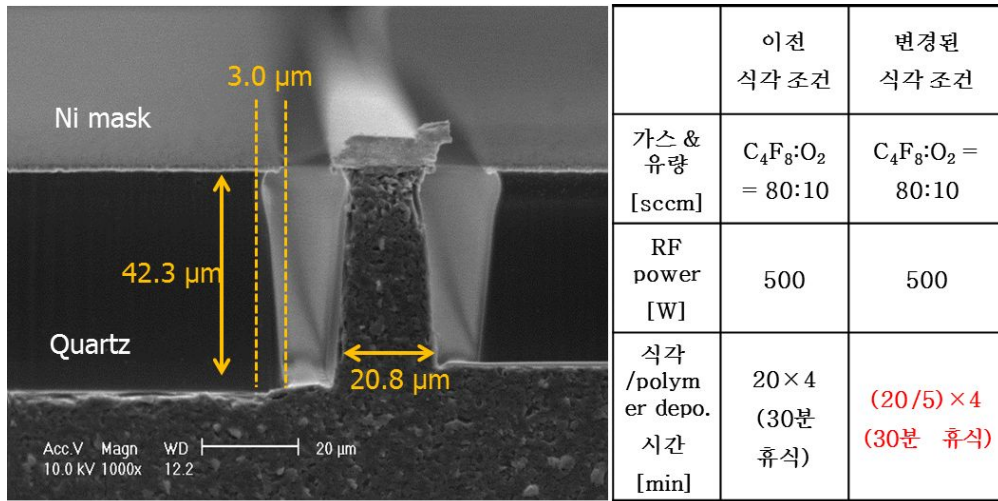


그림 4-23. 식각 & 폴리머 증착 실험 결과

표 4-6. 식각 & 폴리머 증착 실험 결과

	선택비 (Ni : quart)	수직 식각율 [ $\mu\text{m}/\text{min}$ ]	식각 깊이 [ $\mu\text{m}$ ]	측면 식각 [ $\mu\text{m}$ ]	Under-cut [ $\mu\text{m}$ ]
이전 조건 결과	1: 65	0.64	26.25	—	3.4
변경된 조건 결과	1: 65	0.53	42.3	2.1	3.0

## 제 5 장 공진자의 설계 및 제작

### 5.1 공진 주파수 설계

앞서 제안한 공정 방법을 통하여, 비정질 수정 기반의 높은 Q 지수를 갖는 공진자를 구현하기 위하여, 양팔보 소리굽쇠(double-ended tuning fork : DETF) 구조를 설계, 제작하였다.

DETF 공진자의 구조는 MEMS 관성 센서에서 공진 시 에너지 손실이 주로 발생하는 스프링과 지지부의 구조만으로 구성되어 있어, 설계가 간단하면서도, 에너지 손실 요인의 분석이 용이한 구조적 특징을 갖고 있다. 또한 양팔이 대칭으로 공진하는 tuning fork 모드에서 지지부에 인가되는 응력을 상쇄할 수 있어 지지부 감쇠에 의한 에너지 손실 요인을 최소화 할 수 있는 구조이다.

일반적으로 in-plane 공진을 통하여 각속도계를 구현할 때, 주변의 잡음에 대한 영향을 최소화 하고, 바이어스 안정도를 줄이기 위해서 높은 공진 주파수를 설계해야 한다. 이 때, 주로 고려되는 잡음요인은 기계적 소음에 의해 발생하는 가청 주파수 대역(0~ 20 kHz)이며, Dean et al.은 이보다 큰 공진 주파수의 설계를 권장하고 있다 [54].

또한 제작된 공진자의 주파수 측정에 사용한 동적 스펙트럼 분석기(dynamic spectrum analyzer : HP 35670A)의 측정 주파수 대역이 1 ~ 51.2 kHz 로서 그 이상의 공진 주파수를 측정하기에 어려움이 있었다.

따라서 DETF 의 공진주파수 대역을 결정하기 위하여 앞서 제안하였던 비정질 수정의 Q 지수 설계 가이드라인에 맞추어 공진 주파수를 30 kHz 로 설정하였다.

## 5.2 DETF 공진자의 구조 설계

### 5.2.1 DETF 공진자의 치수설계

공진 주파수 30 kHz 에 대하여 앞서 제안된 공진 주파수에 따른 비정질 수정 공진자의 최적 조건은 아래의 그림에서와 같이 폭 20  $\mu\text{m}$ , 길이 2000  $\mu\text{m}$  의 크기에서 형성됨을 알 수 있다.

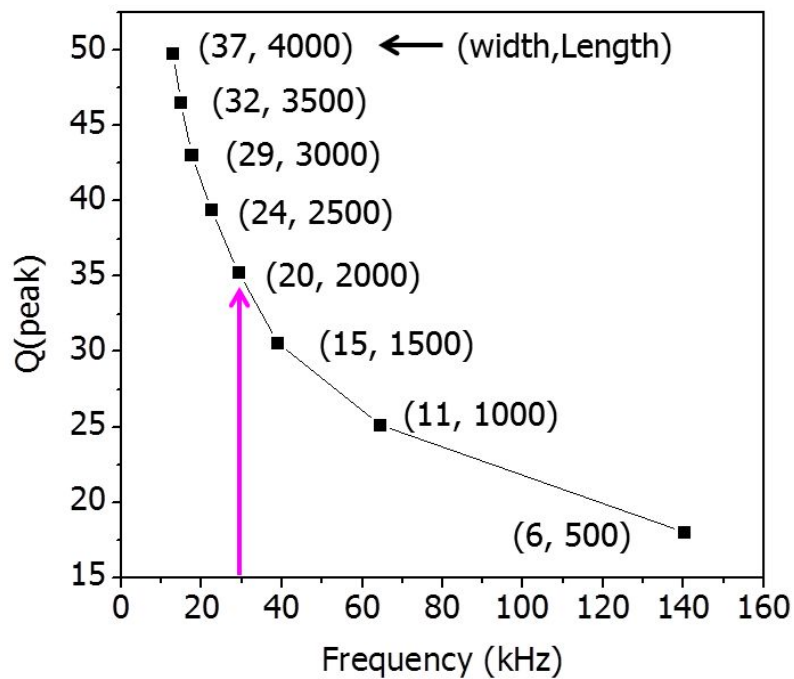
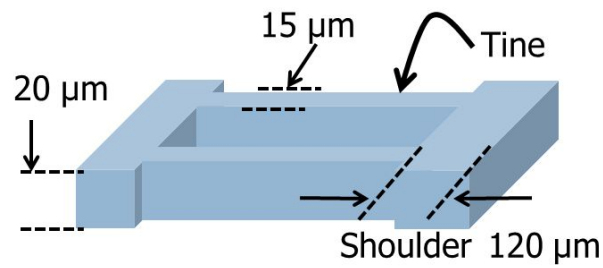


그림 5-1. DETF 공진자의 치수 및 공진주파수 대응 관계

한편, DETF 공진자의 폭이 20  $\mu\text{m}$  일 경우, 원활한 in-plane 모드 공진을 위한 고종횡비 구조를 제작하기 위해서는 약 30  $\mu\text{m}$  이상의 길이 식각이 필요하게 된다. 그러나, 식각 수정 건식 식각에서 발생하는 측면 식각의 오차를 1~2  $\mu\text{m}$  수준으로 줄이기 위해서 제작되는

DETF 의 높이를  $20\ \mu\text{m}$  수준으로 낮추었다. 이에 따라 DETF 의 폭을  $15\ \mu\text{m}$  , 길이는  $1695\ \mu\text{m}$  로 설정하였다.

아래의 그림과 표는 설계된 DETF 의 구조를 나타낸 것이다.



Designed DETF resonator

그림 5-2. DETF 공진자의 구조물 치수

표 5-1. DETF 공진자의 설계 변수

Design parameter	Value
Resonant frequency	30 kHz
Tine width	$15\ \mu\text{m}$
Device height	$20\ \mu\text{m}$
Gap between tines	$100\ \mu\text{m}$
Shoulder	$120\ \mu\text{m}$
Tine length	$1695\ \mu\text{m}$

### 5.2.2 DETF 공진자의 전극 설계

DETF 공진자는 그림 5-3-(a)와 같은 구조로 전극이 설계되었다. DETF의 tine이 서로 대칭적으로 움직이는 tuning fork 모드 구동을 위하여, 양단에 같은 위상의 AC 구동 전압이 인가되어야 하므로, 감지 전극은 tine의 안쪽에 위치하였다. 이러한 감지전극의 위치는 그림 5-3-(b)와 같이 DETF 구조물에 인가되는 DC 전압으로 인해 AC 구동 전압의 feed-through noise를 차폐할 수 있는 효과도 같이 고려하였다.

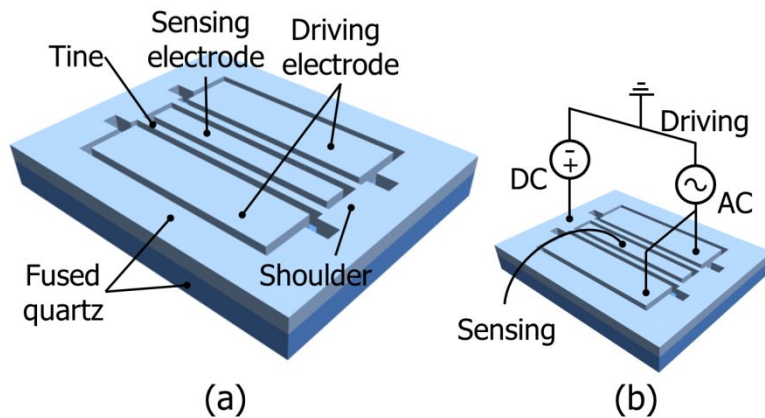


그림 5-3. DETF 공진자 구조(a) 및 정전구동의 모식도(b)

그림 5-4는 제작된 DETF 공진자의 마스크를 나타낸 것이다. DETF의 tine과 전극간의 간격은 앞서 진행된 건식 식각 공정 결과를 반영하여  $5\mu\text{m}$ 로 설계되었다.



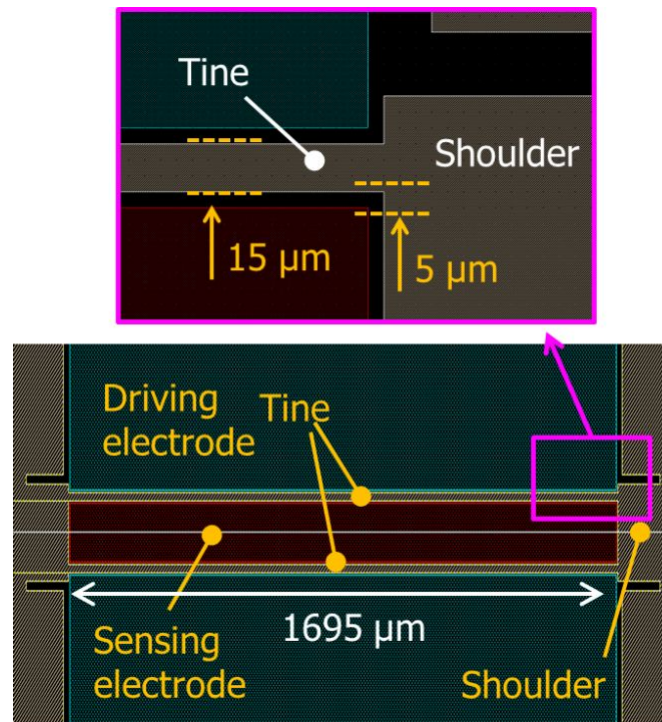


그림 5-4. DETF 공진자 마스크 : (a) DETF 공진자의 전체 구조, (b) tine 과 전극의 간격 ( $5\ \mu\text{m}$ )

### 5.2.3 DETF 공진자의 예상 Q 지수

#### 5.2.3.1 시뮬레이션의 신뢰성

DETF 공진자의 Q 지수는 열탄성 감쇠에 의한 Q 지수와 지지부 감쇠에 의한 Q 지수를 종합하여 계산할 수 있다. 이때, 열탄성 감쇠는 앞서 설명한 Zener's eq. 을 통하여 이론적인 계산이 가능하지만, 지지부 감쇠의 경우, 구조물의 치수에 따라 양상이 달라지기 때문에, 시뮬레이터를 활용하여 Q 지수를 예상하였다. 열탄성 감쇠 시뮬레이션은 COMSOL 3.5, 지지부 감쇠의 시뮬레이션은 COMSOL 4.3 를 각각 이용하였다. 시뮬레이션의 신뢰성을 알아보기 위하여, 양팔보 구조에 대하여 이론적인 계산값과 시뮬레이션의 결과값을 아래와 같이 비교하여 보았다.

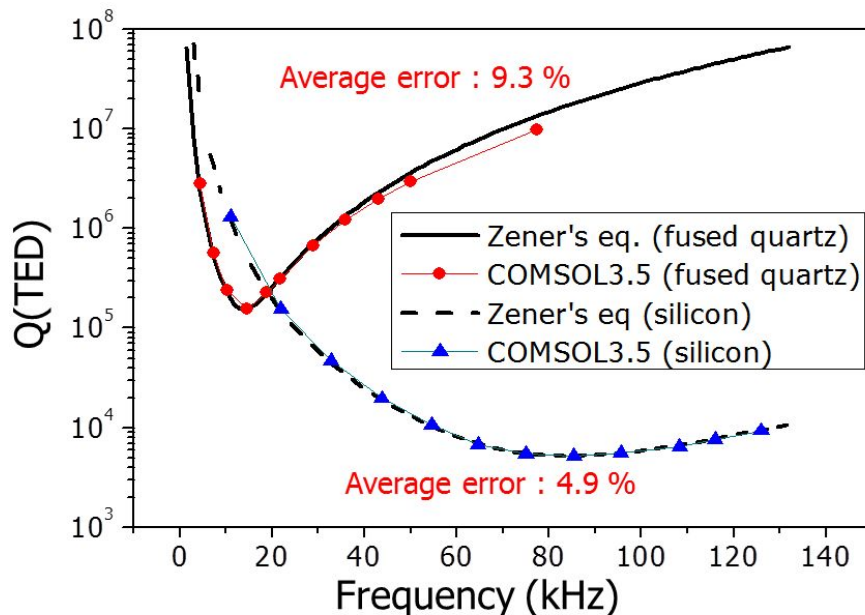


그림 5-5. 열탄성 감쇠에 대한 시뮬레이션 및 이론값

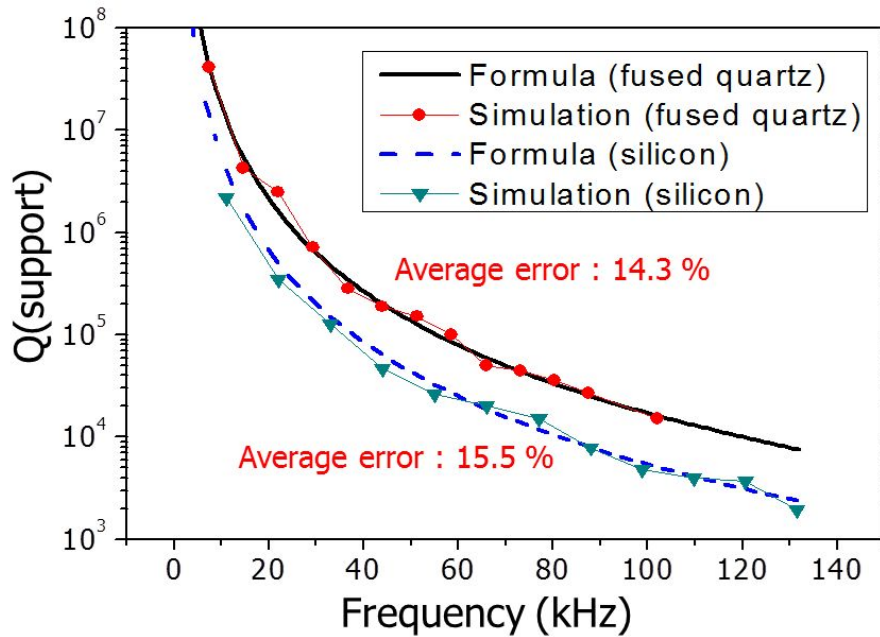


그림 5-6. 지지부 감쇠에 대한 시뮬레이션 및 이론값

시뮬레이션 결과와 이론값을 비교하였을 때, 열탄성 감쇠의 경우 비정질 수정의 경우 9.3 %, 단결정 실리콘의 경우 4.9 %의 오차율을 보였으며, 지지부 감쇠의 경우, 약 15 % 내외의 오차율을 보였다. 이상의 결과를 볼 때, 시뮬레이션을 통한 Q 지수값은 이론적인 값보다 약 10 ~ 15 %의 오차율을 감안하여 예상할 수 있음을 알 수 있었다.

#### 5.2.3.2 DETF 공진자의 Q 지수 시뮬레이션

비정질 수정과 단결정 실리콘으로 이루어진 DETF 공진자의 Q 지수를 예상하기 위하여, DETF의 길이를 1695  $\mu\text{m}$ 로 고정하고, 폭을 3 ~ 35  $\mu\text{m}$ 까지 변화를 주어 Q 지수를 예상하였으며, 비정질 수정의 경우, 30 kHz의 공진주파수에서 약  $11 \times 10^4$  수준의 Q 지수가 예상되었으며, 같은 크기의 DETF에서 단결정 실리콘의 경우는 44 kHz의 공진주파수에서

약  $3 \times 10^4$  수준의 Q 지수가 예상되었다.

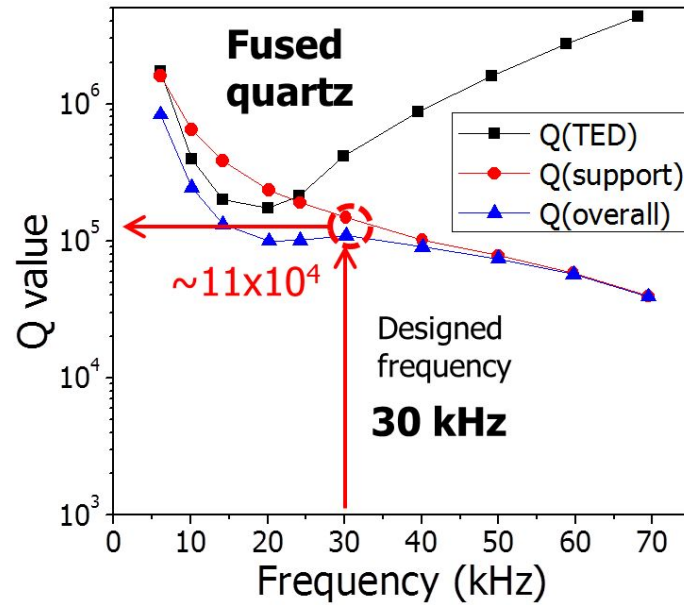


그림 5-7. 비정질 수정 DETF 공진자의 Q 지수 예상 곡선

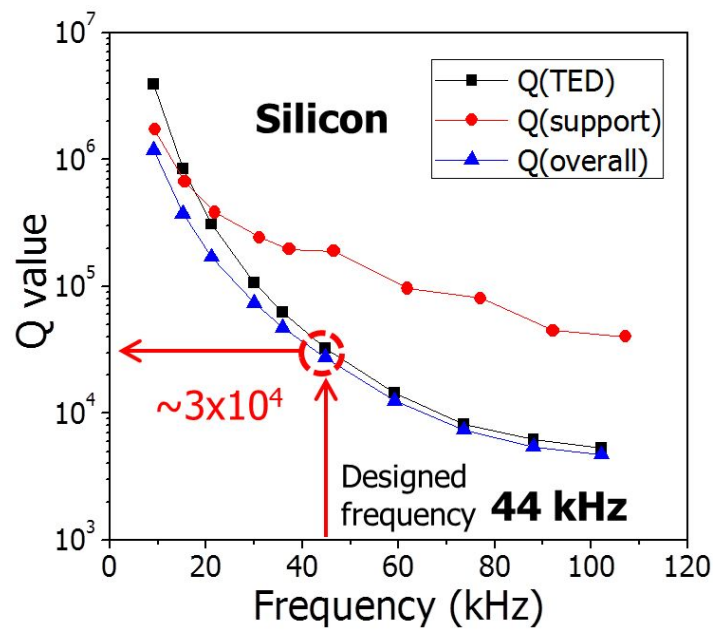
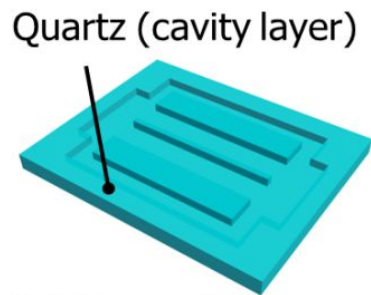


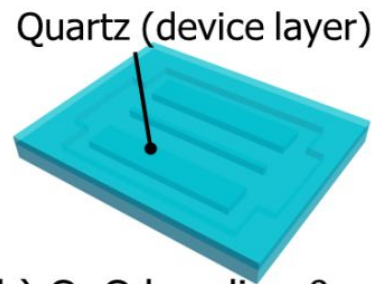
그림 5-8. 단결정 실리콘 DETF 공진자의 예상 Q 지수 곡선

### 5.3 공정도

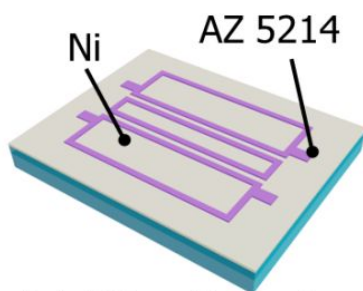
비정질 수정 DETF 공진자의 제작 공정은 아래 그림과 같이 정리할 수 있다. 먼저 바닥 기관이 되는 비정질 수정 웨이퍼에 Cr/Au 마스크를 형성한 후 BOE ( $\text{NH}_4\text{F} : \text{HF} = 5:1$ ) 용액으로  $5 \mu\text{m}$  깊이의 공동(cavity)을 형성한다 (그림 5-9-a). Cr/Au 마스크를 제거한 후 공진자 구조물이 형성될 비정질 수정 웨이퍼를 접합한다. 접합 공정은 다음과 같은 과정으로 이루어진다. 두 비정질 수정 웨이퍼에 RCA1 용액을 사용하여 세정 및 표면 친수성을 유도하고, 두 웨이퍼의 접합면을  $\text{O}_2$  플라즈마를 이용하여 활성화시켜 상온에서 접합을 실시한다. 이 때 활성화된 웨이퍼 표면에서는 자발적인 접합이 이루어진다. 이후  $300^\circ\text{C}$  미만의 저온 조건에서 약 8 시간의 열처리 과정을 통해 웨이퍼 사이의 수분을 제거하고, 웨이퍼 표면의 반 테르발스 힘을 유도하여 접합력을 증가시킨다. 이후 CMP 공정으로 수정 구조물의 두께를 조절하고 (그림 5-9-b), 약  $1.5 \mu\text{m}$  두께의 Ni 마스크를 도금으로 형성한다 (그림 5-9-c). PR 및 씨앗층(seed layer)을 제거하고,  $\text{C}_4\text{F}_8/\text{O}_2$  혼합 가스를 통해 수정 건식 식각을 실시하여 수정 공진자 구조물을 형성한다. 이때 동시에 구조물의 부양도 같이 이루어지게 된다 (그림 5-9-d). 이후 Ni 마스크를 제거하고, Cr/Au 스퍼터를 이용하여 구동 및 감지 전극을 형성한다 (그림 5-9-e, 5-9-f).



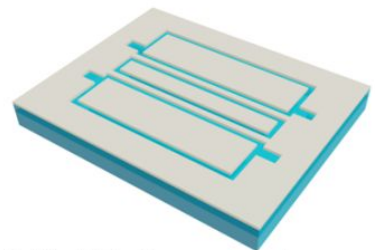
(a) Cavity layer wet etch



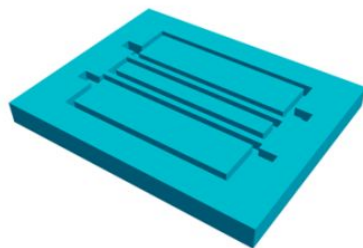
(b) QoQ bonding & CMP



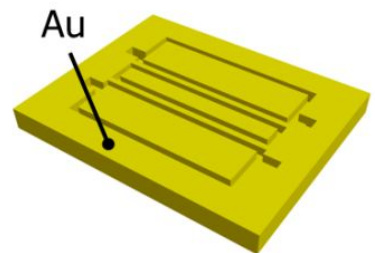
(c) PR pattern & electroplating (Ni)



(d) PR & seed layer removing



(e) Quartz DRIE & Ni mask removing



(f) Sputtering (Cr/Au )

그림 5-9. 비정질 수정 DETF 공진자 공정도

## 5.4 제작 결과

### 5.4.1 비정질 수정 DETF 공진자

그림 5-10 과 그림 5-11 은 각각 웨이퍼 레벨로 제작된 비정질 수정 DETF 공진자와 SEM 이미지를 보여주고 있다. 공진자는 그림 5-10-a 와 같이 웨이퍼 단위 공정을 통해 제작되었으며, 5-10-b 와 같이 시편으로 제작되어 PCB 기판위에 wire-bonding 되었다.

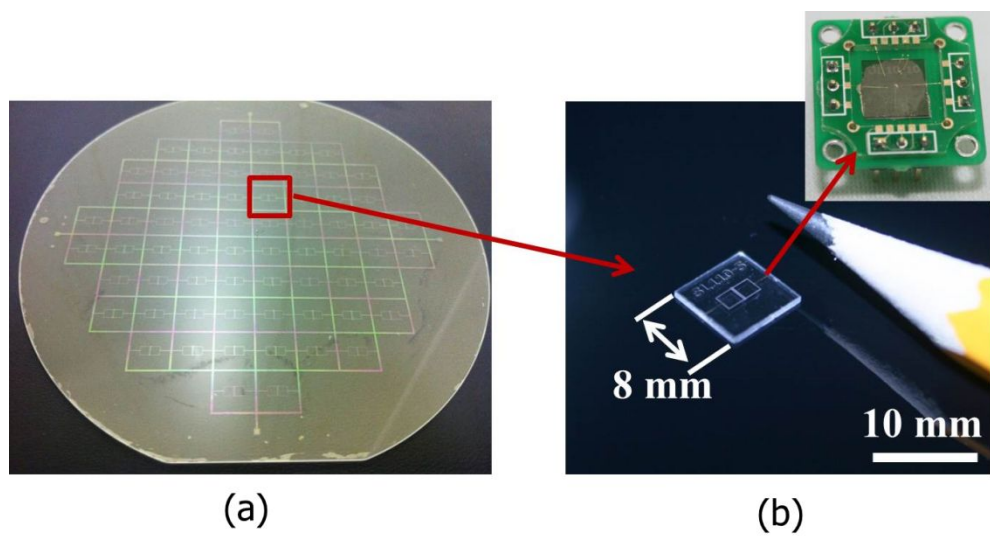


그림 5-10. 웨이퍼 단위로 제작된 비정질 수정 DETF 공진자 : (a) 웨이퍼 단위 공정 , (b) DETF 공진자 시편 및 winring 이후의 모습

제작된 구조물은 그림 5-11-b 에서와 같이 공동층(cavity layer) 바로 위에 정렬되어 형성된 모습을 볼 수 있으며, 충분히 부양된 모습을 같이 확인할 수 있다.



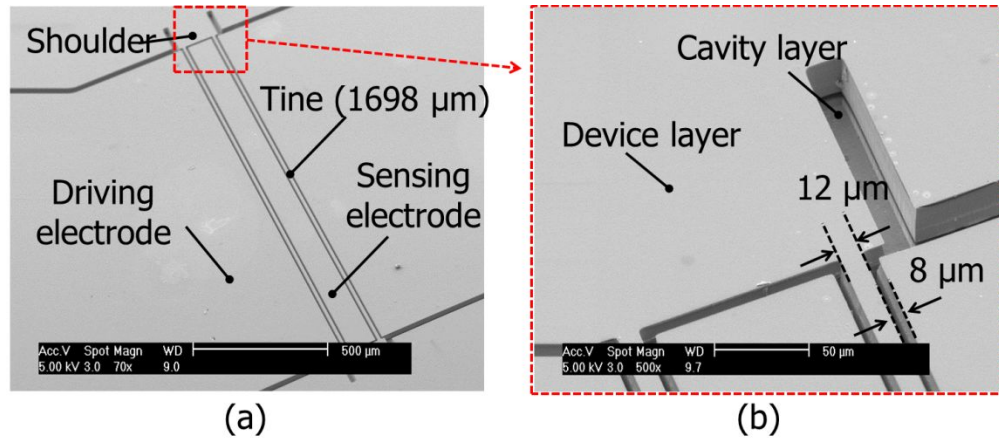


그림 5-11. 비정질 수정 DETF 공진자 SEM 촬영 결과 : (a) 제작된 비정질 수정 DETF 공진자의 모습( $3\ \mu\text{m}$  측면 손실 발생) , (b) DETF 공진자의 부양된 모습과 tine-전극 간격 ( $8\ \mu\text{m}$ )

비정질 수정 DETF 의 설계된 값과 제작 이후의 측정값을 비교하여 아래의 표로 나타내었다.

표 5-2. 제작된 비정질 수정 DETF 공진자의 치수

	Height	Tine length	Shoulder length	Tine width	Structure-electrode gap
Designed values ( $\mu\text{m}$ )	20	1695	120	15	5
Fabricated values ( $\mu\text{m}$ )	17 ~ 18.5	1698	120	12 ~ 13	7 ~ 8



#### 5.4.2 단결정 실리콘 DETF 공진자

제작된 비정질 수정 DETF 와 Q 지수를 비교하기 위하여 그림 5-12 와 같이 동일한 크기의 단결정 수정 DETF 를 SOI 웨이퍼를 사용하여 제작하였다. 웨이퍼의 구조물 층의 높이는 약 20 ~ 22  $\mu\text{m}$  로 측정되었으며, box 층의 높이는 약 3~ 4  $\mu\text{m}$  로 비정질 수정의 cavity 층과 비슷한 수준의 높이를 확인하였다. 제작된 실리콘 DETF 공진자의 모습을 현미경 사진을 통해 아래와 같이 나타낼 수 있었다.

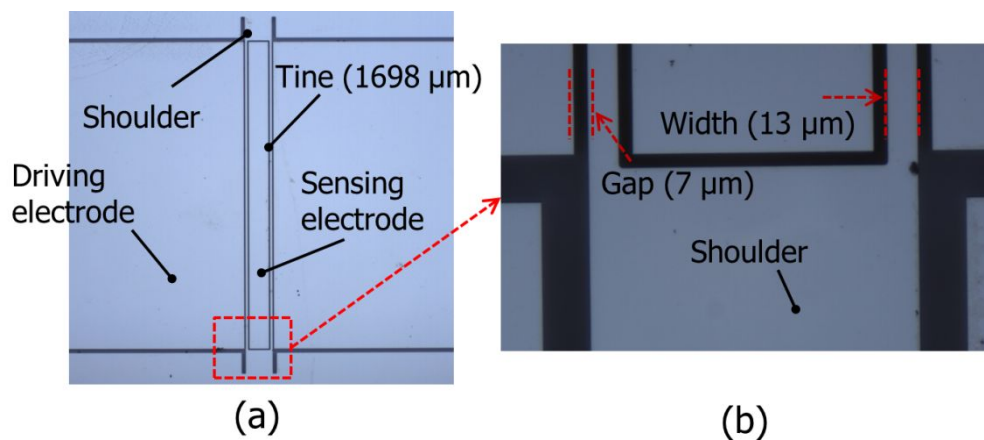


그림 5-12. 제작된 단결정 실리콘 DETF 공진자 결과 : (a) DETF 공진자의 모습( $\sim 3 \mu\text{m}$  측면 손실 발생) , (b) tine-전극 간격 ( $7 \mu\text{m}$ )

제작 결과 비정질 수정의 공정 조건과 비교하여, 안정화된 건식 식각 조건으로 인하여, 제작된 공진자의 크기는 큰 차이가 없었으나, 디자인된 패턴에 대하여 약 1  $\mu\text{m}$  로 정도의 공정 오차가 발생하여, DETF 의 길이는 약 1698  $\mu\text{m}$  로 증가하였고, 폭은 13  $\mu\text{m}$  로 좁아졌음을 확인할 수 있었다. 그 결과 공정 오차가 있음에도 불구하고, 비정질 수정의

DETF 제작 결과와 아주 유사한 크기의 단결정 실리콘 DETF 가 제작되었음을 확인할 수 있었다.

단결정 실리콘 DETF 공진자의 설계된 값과 제작 이후의 측정값을 비교하여 표 5-3 과 같이 나타내었다.

표 5-3. 제작된 단결정 실리콘 DETF 공진자의 치수

	Height	Tine Length	Shoulder length	Tine width	Structure-electrode gap
Designed values ( $\mu\text{m}$ )	20	1695	120	15	5
Fabricated values ( $\mu\text{m}$ )	20 ~ 22	1698	120	13	7

## 제 6 장 공진자 구동 실험

### 6.1 정전구동 및 자가 발진 실험

#### 6.1.1 정전 구동 및 광학 측정 실험

회로를 통한 공진 주파수의 측정 이전에 PCB 로 제작된 시편을 정전력을 인가하여 공진 시키고, 구동 여부 및 공진 주파수를 광학 측정을 통해 확인하였다. 정전 구동 회로는 중앙대 ‘광신호 및 레이저응용 연구실’ (김호성 교수님)의 도움을 받아 제작되었다. 측정 장비는 광학 헤테로다인식의 미세 진동 측정 장치(optical heterodyne small vibro-meter measuring system: MLD-103)와 동적 스펙트럼 분석기(dynamic spectrum analyzer : HP 35670A)를 사용하였다.

측정의 조건은 다음 표와 같다.

표 6-1. 광학 측정 조건

구동 전압		주파수 sweep span		진공도 ( $10^{-6}$ Torr)
DC	AC	전체 (resol.)	부분 (resol.)	
5V	100 mV	51.2 kHz (32 Hz)	1.6 kHz (1 Hz)	3 ~ 5

비정질 수정 DETF 공진자의 광학측정으로 관찰한 주파수 응답 특성을 통하여 공진 주파수를 아래 그림과 같이 확인할 수 있었다.

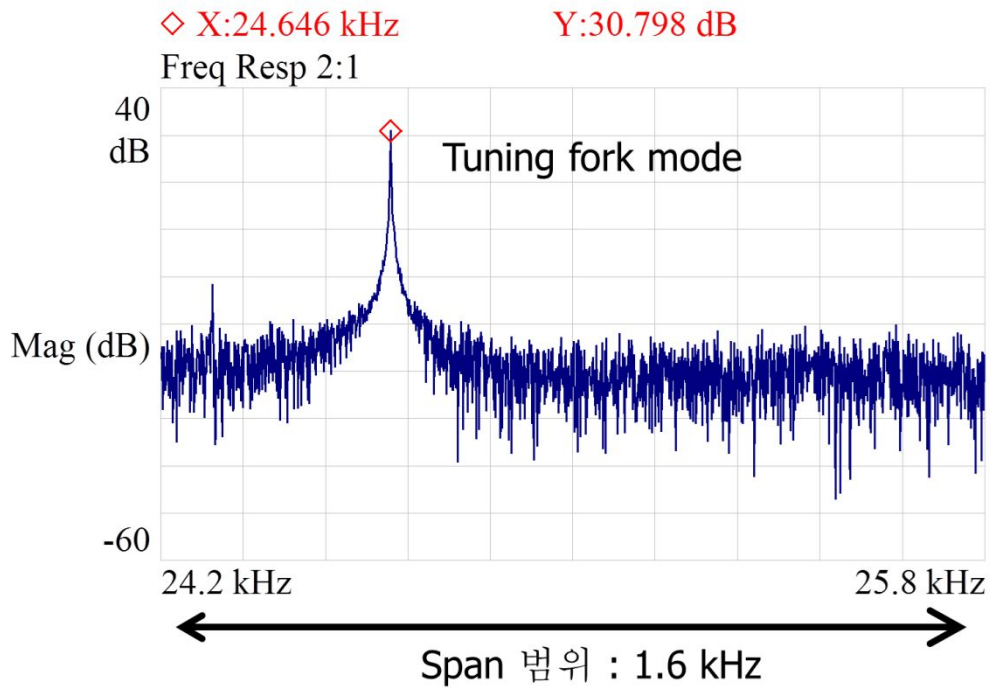


그림 6-1. 광학 sweep 측정 결과

부분 sweep 의 경우 resolution 간격이 1 Hz 로서 시뮬레이션으로 알아본 공진모드의 발생 여부를 정확히 확인할 수 있으며, 위의 그림에서 보듯이 약 24.646 kHz 에서 tuning-fork 모드로 동작함을 확인할 수 있었다.

### 6.1.2 자가 발진 실험

광학 측정에서 확인한 tuning-fork 공진 주파수 대역에서, DC 전압만을 인가했을 때의 자가발진 여부를 확인하기 위하여 그림 6-2 와 같은 회로를 구성하였다.

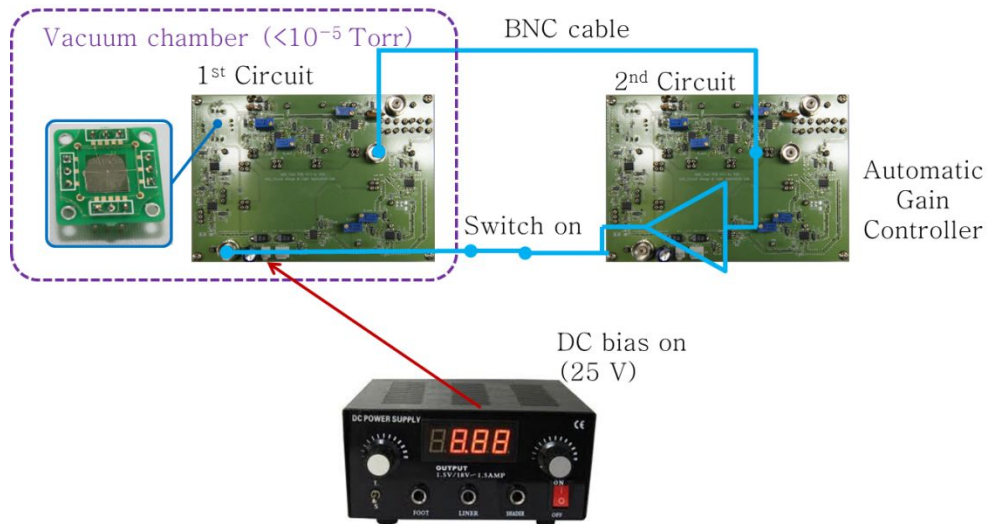


그림 6-2. 자가발진 회로 구성도

제작된 공진자를 발진하기 위하여, 약  $10^{-5}$  Torr 이하의 진공 분위기를 형성하였으며, 진공 챔버 외부에서 자가발진을 유도하기 위한 AGC (automatic gain controller)를 조절하도록 실험을 장치하였다. 자가 발시 DC 전압은 시편에 따라 20 ~ 25 V 로 인가되었으며, 아래 그림과 같이 tuning-fork 공진 주파수에서 성공적으로 자가 발진하는 모습을 확인할 수 있었다.

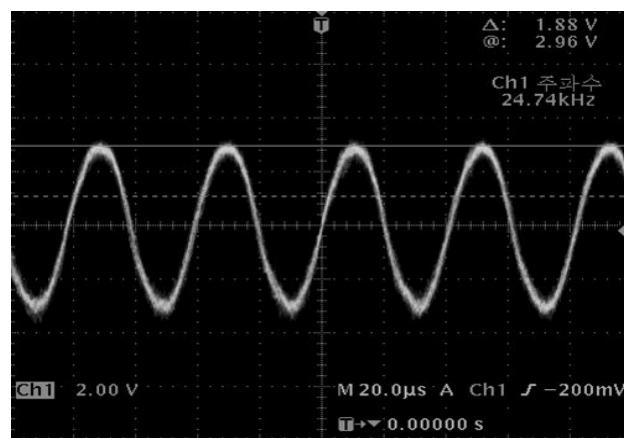


그림 6-3. 비정질 수정 DETF 공진자의 자가발진 결과

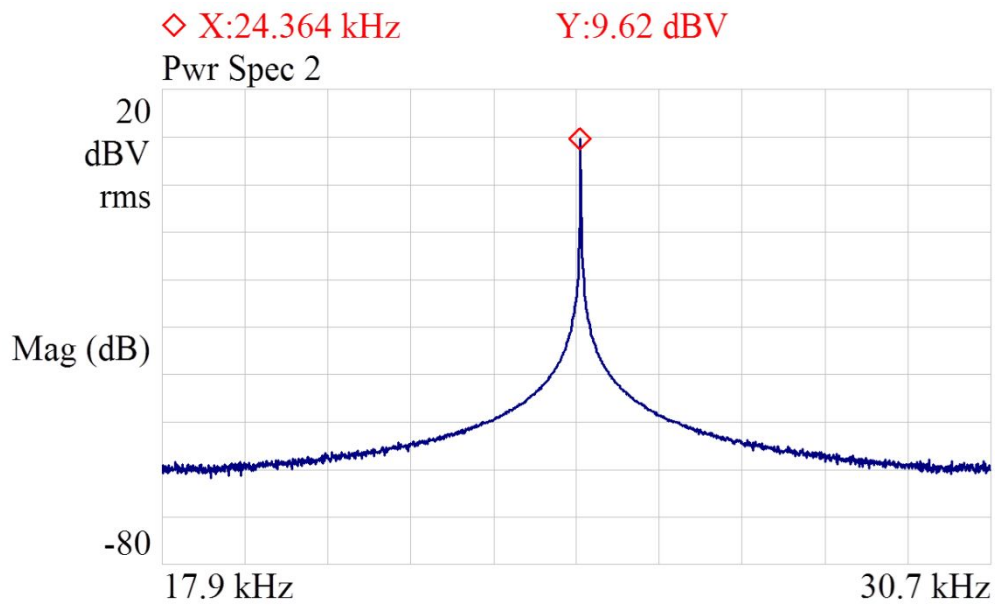


그림 6-4. Tuning-fork 모드 자가발진

(DC 전압 : 25 V 인가)

위의 그림에서와 같이 24.364 kHz 에서 자가발진이 이루어짐을 확인하였다. 이는 정전 구동 및 회로 측정에서 관찰한 공진 주파수보다 약 300 Hz shift 된 결과를 볼 수 있었는데, 이는 정전구동 시 인가했던 DC 전압(5 V)보다 높은 25 V 를 인가했기 때문에 전기적 강성(electrical stiffness)이 작아져 공진 주파수가 작아진 것으로 판단된다.

## 6.2 Q 지수 측정 실험 (ring-down 실험)

### 6.2.1 비정질 수정 DETF 공진자

자가발진된 DETF 공진자의 Q 지수를 측정하기 위하여, 아래의 그림과 같이 ring-down test 를 실시하고, 그 결과를 표와 같이 정리 할 수 있었다

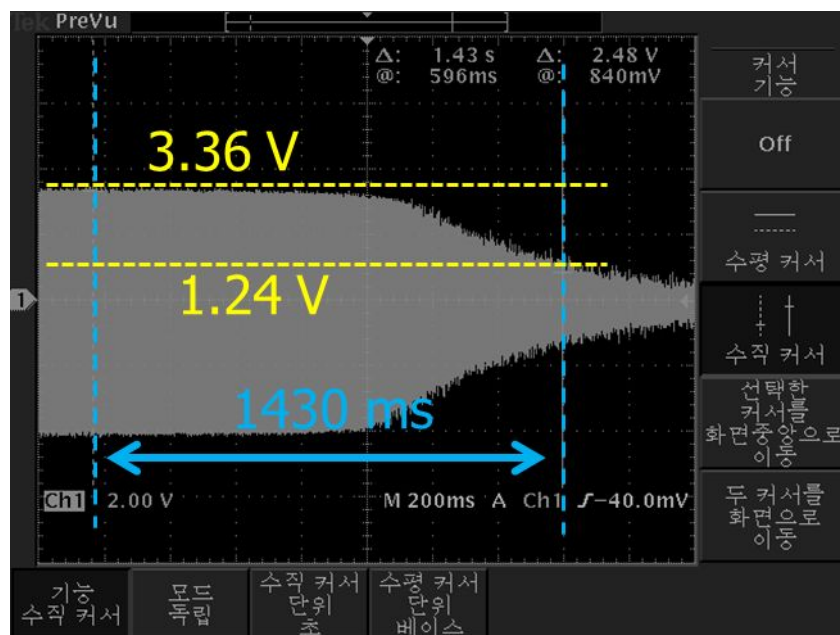


그림 6-5. Ring-down test 결과 (비정질 수정 DETF)

Ring-down test 를 진행한 시편은 모두 7 개였으며, 측정된 Q-지수의 값은 약 64,500 ~ 111,400 으로 비교적 큰 편차를 보였다. 7 개 시편에 대한 평균 Q 지수는 약 84,000 의 수준으로 측정되었으며, 오차는  $\pm 17,000$  이었다. 측정된 Q-지수는 아래와

같이 정리할 수 있었다.

표 6-2. 측정된 Q 지수 (비정질 수정 DETF)

Num.	Frequency (kHz)	$\Delta t$ (ms)	Q
#1	25.172	816	64,530
#2	22.833	1200	86,078
#3	24.791	1430	111,373
#4	23.213	1118	81,531
#5	25.959	1010	82368
#6	24.316	1250	95488
#7	23.399	1160	85,273



### 6.2.2 단결정 실리콘 DETF 공진자

비정질 수정 DETF 공진자와 Q 지수를 비교하기 위하여 제작된 단결정 실리콘 DETF 공진자의 ring-down 실험은 아래의 그림과 같이 진행 되었다.

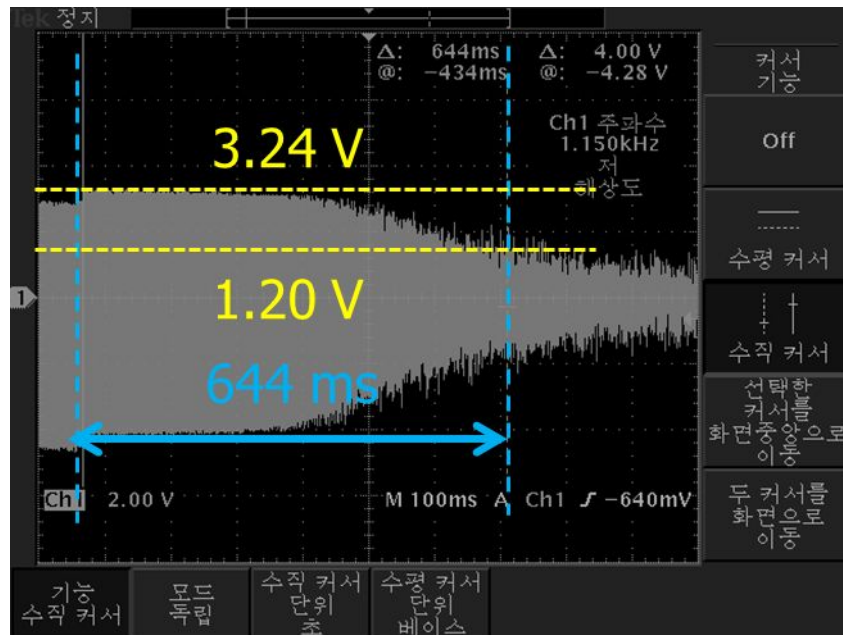


그림 6-6. Ring-down test 결과 (단결정 실리콘 DETF)

측정된 단결정 실리콘 DETF 시편은 모두 11 개였으며, 측정된 Q-지수의 값은 약 49,500 ~ 78,300 으로 비정질 수정 DETF 에 비하여 작은 큰 편차를 보였다. 이는 공정상의 안정도로 인하여, 제작된 시편의 크기 편차가 작았기 때문으로 판단된다. 시편에 대한 평균 Q 지수는 약 63,000 의 수준으로 측정되었으며, 오차는  $\pm 7,600$  이었다. 측정된 Q-지수는 표 6-3 과 같이 정리할 수

있었다.

표 6-3. 측정된 Q 지수(단결정 실리콘 DETF)

Num.	Frequency (kHz)	$\Delta t$ (ms)	Q
#1	39.256	402	49,577
#2	39.704	502	62,616
#3	39.752	568	70,934
#4	39.16	516	63,480
#5	39.24	474	58,432
#6	<b>38.72</b>	<b>644</b>	<b>78,337</b>
#7	37.032	542	63,055
#8	37.648	554	65,524
#9	37.696	572	67,739
#10	38.264	496	59,624

## 제 7 장 결과 및 토의

### 7.1 실험 결과의 정리

제작된 비정질 수정 및 단결정 실리콘 DETF 공진자의 Q 지수를 비교하면, 그림 7-1 과 같다.

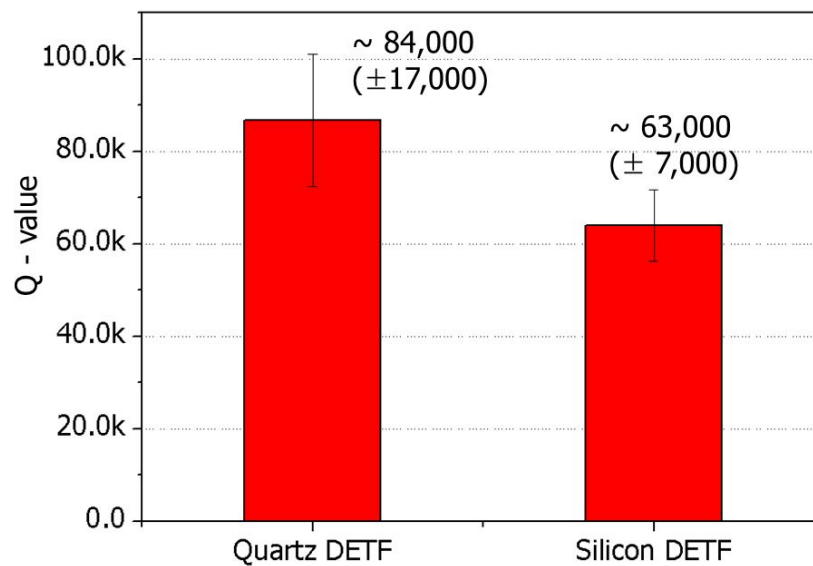


그림 7-1. 비정질 수정 및 단결정 실리콘 DETF 의 Q 지수 비교

모두 7 개의 비정질 수정 DETF 공진자에 대하여 Q 지수 측정이 이루어졌으며, 평균 Q-지수는 약 84,000 ( $\pm 17,000$ )으로 측정되었다. 동일 구조의 실리콘 DETF 의 경우, 측정된 시편은 11 개였으며, 평균 Q-지수는 약 63,000 ( $\pm 7,000$ )으로 측정되었다. 제작된 비정질 수정

DETF 와 단결정 실리콘 DETF 모두 구조물의 선폭이 설계된 치수보다 약 2 ~ 3  $\mu\text{m}$  얇게 제작이 되었으며, 이로 인하여 공진 주파수 또한 약 5.5 ~ 6 kHz 가량 낮아지게 측정이 되었다. 이 같은 공진 주파수의 변화는 비정질 수정의 경우 Q 값의 하락으로, 단결정 실리콘의 경우 Q 값의 상승으로 나타날 것임을 시뮬레이션을 통해 도출된 Q 지수의 예상 곡선을 통해 미루어 짐작할 수 있다.

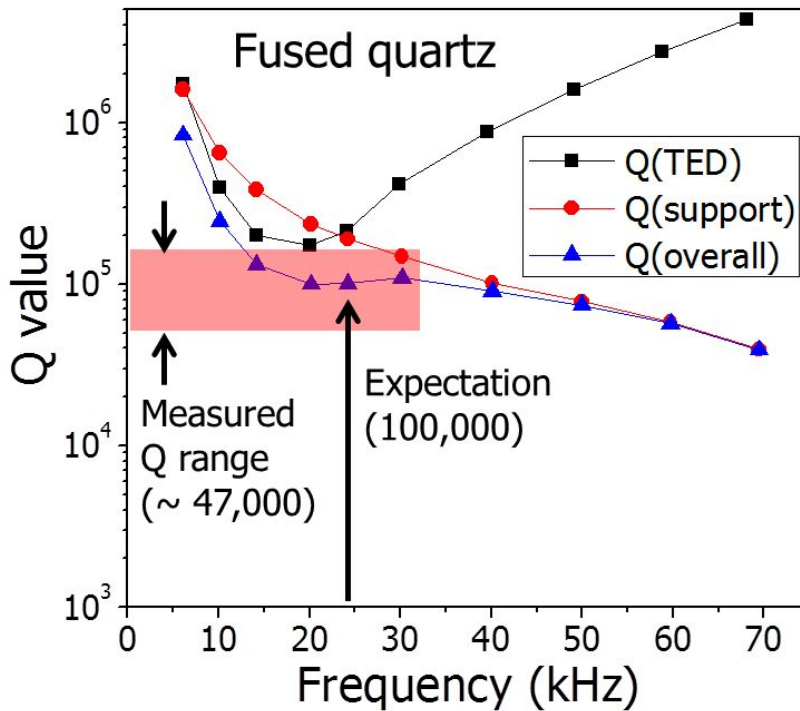


그림 7-2. 비정질 수정 DETF 공진자의 예상 Q 지수 및 측정 Q 지수

위의 Q 지수 예상 곡선에 의하면, 선폭 손실에 의한 주파수 변화를 감안한 비정질 수정 DETF 의 예상 Q 지수는 약 100,00 의 수준이었으나, 제작된 DETF 의 Q 지수는 이론값보다 약 16,000 정도 작은 평균을 보였다. 이러한 원인은 열탄성 감쇠와 지지부 감쇠 이외에,

수정 건식 식각 시 발생한 측면 식각, 표면의 거칠기 등의 요인으로 인하여 에너지 손실이 발생한 것으로 판단된다.

단결정 실리콘의 경우, 선폭 손실에 의한 주파수 변화를 감안할 때, Q 지수는 약 50,000 의 수준으로 예상되었다. 실제 Q 지수의 평균값은 예상값보다 약 13,000 정도 높은 값으로 측정되었으나, 이는 시뮬레이션상의 약 15 % 오차율과 비슷한 차이로 여겨진다.

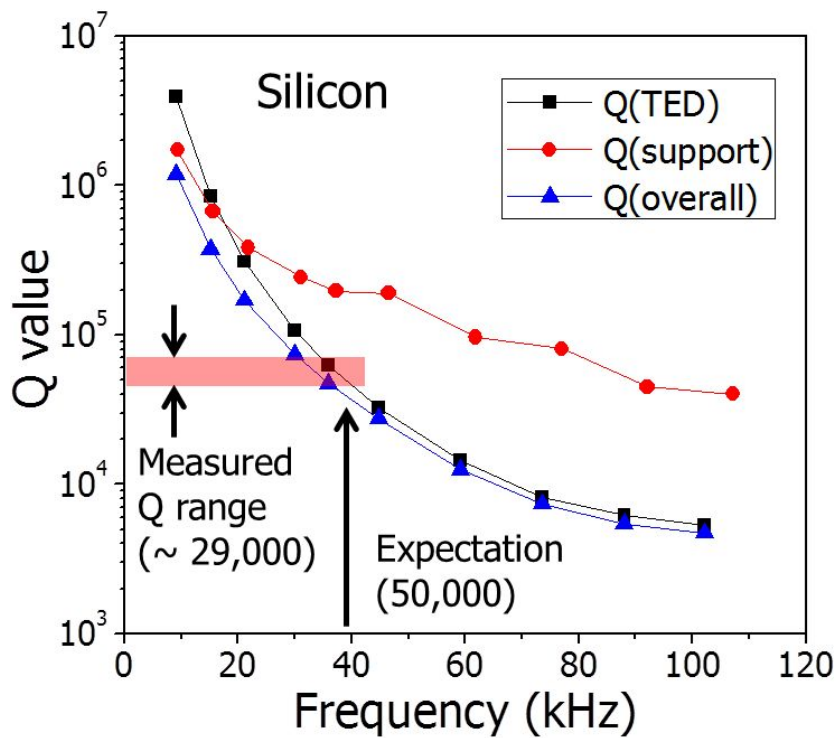


그림 7-3. 단결정실리콘 DETF 공진자의 예상 Q 지수 및 측정 Q 지수

위 실험 결과를 통해 비정질 수정의 열탄성 감쇠 특성이 반영된 높은 Q 지수의 DETF 공진자의 구현이 이루어졌음을 확인할 수 있었고, 동일한 구조의 단결정 DETF 공진자보다 높은 Q 지수가 형성되었음을 실험적으로 확인할 수 있었다.

## 7.2 Q 지수의 향상을 위한 디자인 방안

본 논문을 통해 제작된 비정질 수정 DETF 공진자는 열탄성 감쇠와 지지부 감쇠에 의한 내부 에너지 손실을 고려하여 공진자의 공진 주파수가 설계 되었다. 이때, 비정질 수정 DETF 공진자와 동일 치수의 단결정 실리콘 공진자의 공진 주파수에 대한 Q 지수의 변화 곡선은 그림 7-4 와 같이 비교 할 수 있다.

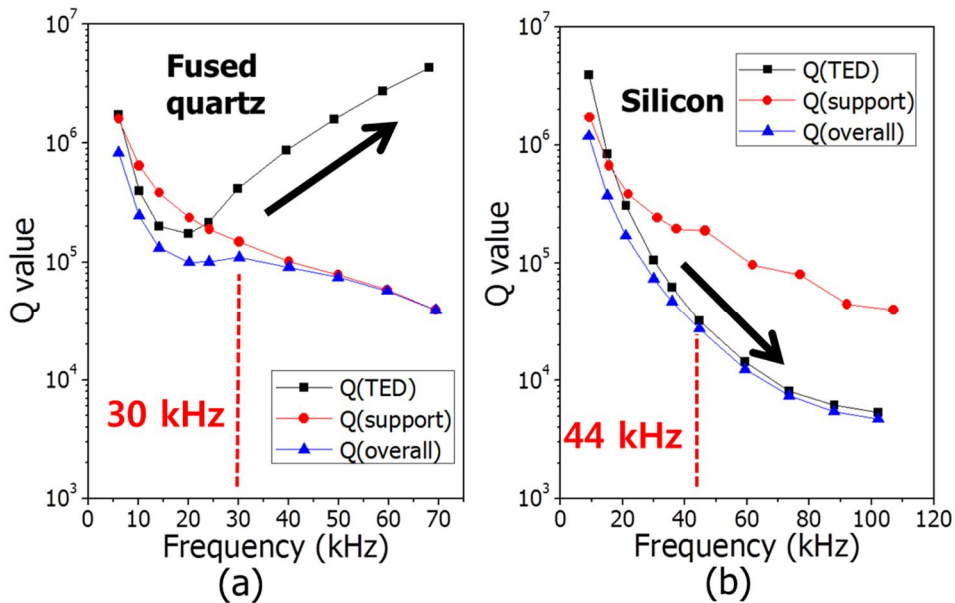


그림 7-4. 동일 치수의 비정질 수정 (a) 및 단결정 실리콘 (b) DETF 공진자의 주파수 변화에 따른 Q 지수 변화 양상(길이  $L = 1695 \mu\text{m}$ )

위의 그래프에서 보면, 비정질 수정 공진자의 경우, 공진 주파수를 증가시켰을 때, 열탄성 감쇠 Q 지수는 증가하는 반면, 지지부 감쇠의

Q 지수는 감소하는 모습을 볼 수 있다. 반대로, 단결정 실리콘 공진자의 경우, 공진 주파수를 증가시켰을 때, 열탄성 감쇠의 Q 지수와 지지부 감쇠의 Q 지수가 같이 감소하는 모습을 볼 수 있다.

따라서 높은 주파수에 대하여 Q 지수의 증가 효과를 볼 수 있는 비정질 수정의 장점을 효과적으로 구현하기 위해서는 지지부 감쇠 Q 지수를 더욱 증가시켜야 한다. 이를 위하여 본 논문에서는 지지부 감쇠의 에너지 손실을 줄이기 위하여, DETF 공진자의 tine 이 대칭으로 공진하는 tuning fork 모드 공진을 이용하였다. 이 경우, 지지부에서의 전단응력의 방향이 서로 상쇄되어 지지부 에너지 손실을 줄일 수 있는 것으로 알려져 있다 [55]. 하지만, 근본적으로 지지부에서의 전단응력을 제거할 수 없을 뿐더러, tine 이 비대칭적으로 제작될 경우, 전단응력의 상쇄 효과를 보장할 수 없다는 단점이 있다. 또한 같은 구조물에서 열탄성 감쇠와 지지부 감쇠가 동시에 이루어지므로, 구조물의 주파수 증가를 통한 Q 지수의 향상에 한계가 있다.

따라서 공진자의 구조에 따른 지지부 감쇠와 열탄성 감쇠를 이원화하여, 지지부 감쇠 Q 지수와 열탄성 감쇠 Q 지수를 동시에 증시키는 디자인이 필요하며. 이러한 공진자의 디자인은 아래 그림 7-5 와 같은 free-free beam 구조를 통해 구현할 수 있을 것으로 보인다.

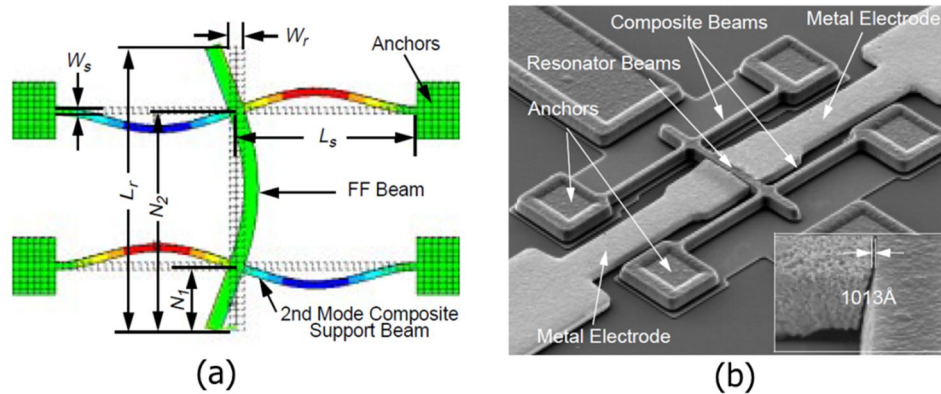


그림 7-5. 지지부 감쇠를 줄이기 위한 free-free beam 공진자 :  
(a) FF-beam 의 공진 모드, (b) polysilicon 으로 제작된 FF-beam

2001 년 Michigan 대학의 Nguyen 그룹은 그림 7-5 와 같은 FF-beam 공진자를 개발하여 지지부 감쇠를 줄였으며, Q 지수의 향상 효과를 보고한 바 있다 [56].

Free-free beam 구조를 응용하여 그림 7-6 과 같은 모양의 공진자를 디자인 할 수 있다.

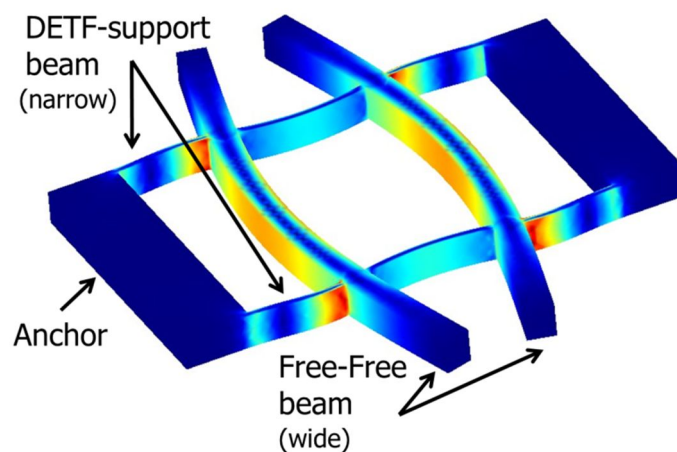


그림 7-6. 제안된 공진자 디자인 모식도



그림 7-6 의 디자인은 공진자의 1 차 혹은 2 차 공진 모드에서 굽힘정도가 다른 부분 보다 덜한 node 부분에 지지부 구조를 연결한 것으로, 지지부의 전단응력을 최소화 할 수 있는 특징이 있다. 이러한 디자인을 통해 열탄성 감쇠와 지지부 감쇠의 발생 부분을 이원화 하여 공진자의 폭을 다르게 설계 할 경우, 열탄성 감쇠와 지지부 감쇠를 동시에 감소 시킬 수 있는 장점이 있다. 즉, 열탄성 감쇠가 주로 발생하는 free-free beam 의 폭을 넓게 설계할 경우, 공진주파수가 증가하게 되어, 열평형 주파수와의 이격을 더욱 유도할 수 있게 되며, 열탄성 Q 지수의 증가를 가져올 수 있다. 또한 지지부 감쇠가 발생하는 DETF 지지부 빔의 폭을 좁게 설계할 경우, 전단 응력의 크기를 줄일 수 있게 되며, 제안된 디자인과 같이 지지부의 빔을 DETF 의 구조로 설계할 경우, 지지부의 인가되는 전단응력의 방향을 상쇄할 수 있게 되어, 지지부의 에너지 손실을 줄일 수 있게 된다. 따라서 열탄성 감쇠와 지지부 감쇠의 크기를 동시에 격감시킴으로써, 비정질 수정 기반의 공진자가 보이고 있는 높은 주파수에서 Q 지수의 증가 효과를 발현시킬 수 있다.

## 제 8 장 결 론

비정질 수정 물질은 단결정 실리콘과 비교하여, 작은 선팅창 계수(단결정 실리콘의 1/5 배)와, 낮은 열전도도(단결정 실리콘의 1/100 배)를 갖고 있어 열안정성이 우수한 물질로 알려져 있다. 이러한 비정질 수정 물질을 활용하여 MEMS 관성센서를 제작할 경우, 높은 열탄성 감쇠 특성을 이용하여, 기존의 실리콘 기반 관성 센서보다 Q 지수를 향상시킬 수 있다. 본 논문에서는 비정질 수정 기반의 고성능 관성센서의 개발 가능성을 타진하고자, 높은 Q 지수를 갖는 비정질 수정 양팔보 소리굽쇠(double-ended tuning fork : DETF) 공진자를 구현하였다.

비정질 수정 및 단결정 실리콘 물질에 대하여 에너지 손실에 따른 Q-지수의 양상을 분석하기 위해, 양팔보 모양의 공진자의 폭과 길이의 변화에 따른 열탄성 감쇠(thermoelastic damping)와 지지부 감쇠(support damping)에 의한 Q-지수를 분석하였다. 그 결과 비정질 수정 기반 공진자의 경우 설계 공진 주파수에 대하여, 구조물의 폭과 길이에 따라 Q-지수의 극대점 설계가 가능함을 논문을 통해 제안하였다.

또한 제안된 높은 Q-지수 극대점 설계에 의하여, 공진 주파수 30 kHz, 길이 1695  $\mu\text{m}$ , 폭 15  $\mu\text{m}$ , 높이 20  $\mu\text{m}$ 의 양팔보 소리굽쇠 구조물을 설계하였다.

설계된 비정질 수정 공진자를 웨이퍼 공정을 통해 구현하기 위하여, 수정-수정 직접 접합 공정을 제안하고, 접합 웨이퍼의 건식 식각을 통해 구조물과 지지층이 모두 비정질 수정으로 이루어진 공진자의 제작 공정을 확립하였다. 수정-수정 직접 접합(quartz-on-quartz direct bonding) 공정은 수정 웨이퍼표면의 세척 및 친수처리,  $\text{O}_2$  플라즈마에 의한 표면

활성화, 열처리 과정을 통해 진행되었다. 또한 접합 공정의 실용성을 확인하기 위하여, O<sub>2</sub> 플라즈마 처리 시간에 따른 표면 에너지와 접합력의 변화, 접합 웨이퍼의 잔류 응력, 재연성 실험을 실시하였다. 그 결과, 평균 약 30 MPa 수준의 접합력을 보이면서도, 약 0.1 MPa 이내의 잔류응력을 갖는 접합 웨이퍼를 제작할 수 있었으며, 재연성 실험을 통해 97% 이상의 접합면적을 갖는 공정의 신뢰성을 확인하였다.

또한 접합 웨이퍼의 건식 식각 공정을 확립하기 위하여, 도금으로 1 ~ 1.5  $\mu\text{m}$  두께의 Ni 마스크를 제작하고, 식각 가스(C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>, He, O<sub>2</sub>)의 농도, 유량, Chuck bias power 의 변화에 따른 식각 실험을 실시하였다. 그 결과, 약 40  $\mu\text{m}$  깊이, 측면 손실 3  $\mu\text{m}$  수준의 건식 식각 공정을 확립하였다.

QoQ 접합 및 건식 식각 공정을 통하여 앞서 설계된 비정질 수정 기반의 DETF 공진자를 제작한 결과, 길이 1698  $\mu\text{m}$ , 높이 20  $\mu\text{m}$ , 선폭 약 12  $\mu\text{m}$  의 DETF 구조물을 제작할 수 있었으며, 약  $5 \sim 6 \times 10^{-5}$  Torr 의 진공도에서 회로를 통한 정전구동 및 자가 발진을 구현하였다.

구동 실험 결과, 공진 주파수는 설계치보다 5 ~ 6 kHz 줄어든 24 ~ 25 kHz 에서 형성되었으며, ring-down test 를 통하여, 제작된 공진자의 Q-지수를 측정하였다.

7 개의 비정질 수정 DETF 공진자에 대하여 평균 Q-지수는 약 84,000 ( $\pm 17,000$ )으로 측정되었다. 동일 구조의 실리콘 DETF 의 경우 측정된 시편은 11 개였으며, 평균 Q-지수는 약 63,000 ( $\pm 7,000$ )으로 측정되었다. 제작된 비정질 수정 DETF 의 공진주파수에서 예상되는 이론적인 Q 지수의 값은 약 100,00 의 수준이었으나, 제작된 DETF 의 Q 지수는 이론값보다 약 16,000 정도 작은 평균을 보였다. 이 같은 평균값은 열탄성 감쇠와 지지부 감쇠 이외에, 정전구동을 위한 금속층,

수정 건식 식각 시 발생한 표면의 거칠기 등의 에너지 손실 요인들로 인해 발생한 것으로 판단되며, 향후 비정질 수정의 식각 공정의 안정화와 더불어, 지지부 감쇠를 줄일 수 있는 설계를 통해 비정질 수정의 높은 열탄성 감쇠 특성을 이용한 높은 Q 지수를 구현할 수 있을 것으로 예상된다.

이상의 실험 결과를 통해 비정질 수정 물질을 활용하여 높은 Q-지수를 갖는 공진자의 제작과 향후 고성능 관성센서의 적용 가능성을 확인할 수 있었다.

## 참고 문헌

- [1] K. E. Petersen, "Silicon as a mechanical material," *Proceedings of the IEEE*, vol. 70, no. 5, pp. 420–457, 1982.
- [2] W. C. Tang, T.-C. H. Nguyen, and R. T. Howe, "Laterally driven polysilicon resonant microstructures," *Sensors and actuators*, vol. 20, no. 1, pp. 25–32, 1989.
- [3] C.-C. Nguyen and R. T. Howe, "An integrated CMOS micromechanical resonator high-Q oscillator," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 34, no. 4, pp. 440–455, 1999.
- [4] W.-T. Hsu and M. Pai, "The new heart beat of electronics—Silicon MEMS oscillators," in *Proc. IEEE 57th Int. Conf. Electronic Components and Technology, 2007*, pp. 1895–1899.
- [5] <http://www.designworldonline.com/6dof-sensors-improve-motion-sensing-applications>
- [6] [http://semiconwest.org/files/JC\\_Eloy.Yole\\_.pdf](http://semiconwest.org/files/JC_Eloy.Yole_.pdf)
- [7] [http://global.epson.com/newsroom/2011/news\\_20110606.html](http://global.epson.com/newsroom/2011/news_20110606.html)
- [8] T. K. Tang, R. C. Gutierrez, C. B. Stell, V. Vorperian, G. A. Arakaki, J. T. Rice, *et al.*, "A packaged silicon MEMS vibratory gyroscope for microspacecraft," in *Proc. IEEE 10th Int. Conf. Micro Electro Mech. Syst.*, 1997, pp. 500–505.
- [9] T. Rogers, N. Aitken, K. Stribley, and J. Boyd, "Improvements in MEMS gyroscope production as a result of using in situ, aligned, current-limited anodic bonding," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 123, pp. 106–110, 2005.
- [10] M. Esashi, "Wafer level packaging of MEMS," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 18, no. 7, p. 073001, 2008.

- [11] D. M. Rozelle, "The hemispherical resonator gyro: From wineglass to the planets," in *Proc. IEEE 19th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting*, 2009, pp. 1157–1178.
- [12] R. L. Kubena and D. T. Chang, "Disc resonator gyroscopes," U.S. Patent 0017287, 2007.
- [13] J. Cho, J.-K. Woo, J. Yan, R. Peterson, and K. Najafi, "A high-Q birdbath resonator gyroscope (BRG)," in *Proc. IEEE 17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems*, 2013, pp. 1847–1850.
- [14] J. Y. Cho, J. Yan, J. A. Gregory, H. W. Eberhart, R. L. Peterson, and K. Najafi, "3-Dimensional Blow Torch-Molding of Fused Silica Microstructures," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 22, no. 6, pp. 1276–1284, 2013.
- [15] B. Le Foulgoc, T. Bourouina, O. Le Traon, A. Bosseboeuf, F. Marty, C. Breluzeau, *et al.*, "Highly decoupled single-crystal silicon resonators: an approach for the intrinsic quality factor," *Journal of micromechanics and microengineering*, vol. 16, no. 6, p. S45, 2006.
- [16] J. Yang, T. Ono, and M. Esashi, "Energy dissipation in submicrometer thick single-crystal silicon cantilevers," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 11, no. 6, pp. 775–783, 2002.
- [17] E.-S. Song, S. Kang, H. Kim, Y.-K. Kim, J.-E. An, and C.-W. Baek, "Wafer-Level Fabrication of a Fused-Quartz Double-Ended Tuning Fork Resonator Oscillator Using Quartz-on-Quartz Direct Bonding," *Electron Device Letters, IEEE*, vol. 34, no. 5, pp. 692–694, 2013.
- [18] W. E. Newell, "Miniaturization of tuning forks," *Science*, vol. 161, no. 3848, pp. 1320–1326, 1968.
- [19] K. Y. Yasumura, T. D. Stowe, E. M. Chow, T. Pfafman, T. W. Kenny, B. C. Stipe, *et al.*, "Quality factors in micron- and submicron-thick cantilevers," *Journal of*

- Microelectromechanical Systems*, vol. 9, no. 1, pp. 117–125, 2000.
- [20] G. De Pasquale, T. Veijola, and A. Somà, "Modelling and validation of air damping in perforated gold and silicon MEMS plates," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 20, no. 1, p. 015010, 2010.
  - [21] M. Bao and H. Yang, "Squeeze film air damping in MEMS," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 136, no. 1, pp. 3–27, 2007.
  - [22] B. Kim, M. A. Hopcroft, R. N. Candler, C. M. Jha, M. Agarwal, R. Melamud, *et al.*, "Temperature dependence of quality factor in MEMS resonators," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 17, no. 3, pp. 755–766, 2008.
  - [23] C. Zener, "Internal friction in solids II. General theory of thermoelastic internal friction," *Physical Review*, vol. 53, no. 1, p. 90, 1938.
  - [24] S. D. Penn, G. M. Harry, A. M. Gretarsson, S. E. Kittelberger, P. R. Saulson, J. J. Schiller, *et al.*, "High quality factor measured in fused silica," *Review of Scientific Instruments*, vol. 72, no. 9, pp. 3670–3673, 2001.
  - [25] Z. L. Hao, A. Erbil, and F. Ayazi, "An analytical model for support loss in micromachined beam resonators with in-plane flexural vibrations," *Sensors and Actuators a-Physical*, vol. 109, no. 2, pp. 156–164, Dec 1 2003.
  - [26] H. Jakobsen, A. Lapadatu, and G. Kittilsland, "Anodic bonding for MEMS," in *Symp. on Semiconductor Wafer Bonding*, 2001.
  - [27] T. Suni, "*Direct wafer bonding for MEMS and microelectronics*", VTT Technical Research Centre of Finland, 2006.
  - [28] U. Gösele and Q.-Y. Tong, "Semiconductor wafer bonding,"

*Annual Review of Materials Science*, vol. 28, no. 1, pp. 215–241, 1998.

- [29] H. Moriceau, O. Rayssac, B. Aspar, and B. Ghyselen, "The bonding energy control: an original way to debondable substrates," in *Proceedings–Electrochemical Society*, 2003, pp. 49–56.
- [30] P. Rangsten, Ö. Vallin, K. Hermansson, and Y. Bäcklund, "Quartz-to-Quartz Direct Bonding," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 146, no. 3, pp. 1104–1105, 1999.
- [31] Z. Liu and D. L. DeVoe, "Micromechanism fabrication using silicon fusion bonding," *Robotics and Computer–integrated Manufacturing*, vol. 17, no. 1, pp. 131–137, 2001.
- [32] Ö. Vallin, B. Einefors, and C. Hedlund, "Surface treatment optimisation for quartz direct bonding," in *Proceedings of the Sixth International Symposium on Semiconductor Wafer Bonding: Science, Technology, and Applications*, 2001.
- [33] Q.–Y. Tong, G. Cha, R. Gafiteanu, and U. Gosele, "Low temperature wafer direct bonding," *Microelectromechanical Systems, Journal of*, vol. 3, no. 1, pp. 29–35, 1994.
- [34] L. Pinckney, "Transparent, high strain point spinel glass–ceramics," *Journal of non–crystalline solids*, vol. 255, no. 2, pp. 171–177, 1999.
- [35] F. Hejda, P. Solar, and J. Kousal, "Surface Free Energy Determination by Contact Angle Measurements–A Comparison of Various Approaches," in *Proceedings of the 19th Annual Conference of Doctoral Students*, 2010, pp. 25–30.
- [36] P. W. Leech, "Reactive ion etching of quartz and silica–based glasses in  $\text{CF}_4$ ,  $\text{CHF}_3$  plasmas," *Vacuum*, vol. 55, no. 3, pp. 191–196, 1999.



- [37] S. Ronggui and G. C. Righini, "Characterization of reactive ion etching of glass and its applications in integrated optics," *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, vol. 9, no. 5, pp. 2709–2712, 1991.
- [38] H. Mori and N. Shimizu, "Multimode deposited silica waveguide and its application to an optical branching circuit," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 30, no. 4, pp. 622–627, 1982.
- [39] S. Valette, S. Renard, H. Denis, J. P. Jadot, A. Fournier, P. Philippe, *et al.*, "Si-Based Integrated-Optics Technologies," *Solid State Technology*, vol. 32, no. 2, pp. 69–75, 1989.
- [40] V. N. Hung, T. Abe, P. N. Minh, and M. Esashi, "High-frequency one-chip multichannel quartz crystal microbalance fabricated by deep RIE," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 108, no. 1, pp. 91–96, 2003.
- [41] L. Li, T. Abe, and M. Esashi, "Smooth surface glass etching by deep reactive ion etching with  $\text{SF}_6$  and Xe gases," *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, vol. 21, no. 6, pp. 2545–2549, 2003.
- [42] "<http://www.spts.com>."
- [43] A. Sankaran and M. J. Kushner, "Fluorocarbon plasma etching and profile evolution of porous low-dielectric-constant silica," *Applied physics letters*, vol. 82, no. 12, pp. 1824–1826, 2003.
- [44] 임연호, "실리콘 산화막의 플라즈마 식각에 대한 표면반응 모델링," *Korean Chemical Engineering Research*, vol. 44, no. 5, pp. 520–527, 2006.
- [45] "<http://www.spts.com/banners/1000th-DRIE-module-sold>,"
- [46] L. A. Donohue, J. Hopkins, R. Barnett, A. Newton, and A. Barker, "Developments in Si and  $\text{SiO}_2$  etching for MEMS-based optical applications," in *Micromachining and*

*Microfabrication*, 2004, pp. 44–53.

- [47] "Lab Manual of Microfabrication Lab (U.C.Berkeley)."
- [48] T. Akashi and Y. Yoshimura, "Profile control of a borosilicate–glass groove formed by deep reactive ion etching," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 18, no. 10, p. 105004, 2008.
- [49] L. Ceriotti, K. Weible, N. De Rooij, and E. Verpoorte, "Rectangular channels for lab–on–a–chip applications," *Microelectronic engineering*, vol. 67, pp. 865–871, 2003.
- [50] H. Chen and C. Fu, "An investigation into the characteristics of deep reactive ion etching of quartz using SU–8 as a mask," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 18, no. 10, p. 105001, 2008.
- [51] L. Rolland, M. Peignon, C. Cardinaud, and G. Turban, "SiO<sub>2</sub>/Si selectivity in high density CHF<sub>3</sub>/CH<sub>4</sub> plasmas: Role of the fluorocarbon layer," *Microelectronic engineering*, vol. 53, no. 1, pp. 375–379, 2000.
- [52] S. Sakamori, J. Matsumoto, K. Yonekura, N. Fujiwara, and H. Miyatake, "Investigation of SiO<sub>2</sub> Etching Using Low Global Warming Gas (Hexafluoropropylene)," in *Proceeding of Symposium on Dry Process*, 1998, pp. 275–280.
- [53] Z. Cao, B. VanDerElzen, K. J. Owen, J. Yan, G. He, R. L. Peterson, *et al.*, "DRIE of fused silica," in *Proc. IEEE 26th Int. Conf. Micro Electro Mech. Syst., Jan. 2013*, pp. 361–364.
- [54] R. N. Dean, G. T. Flowers, A. S. Hodel, G. Roth, S. Castro, R. Zhou, *et al.*, "On the degradation of MEMS gyroscope performance in the presence of high power acoustic noise," in *Proc. IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2007, pp. 1435–1440.

- [55] M. Zaman, A. Sharma, and F. Ayazi, "High performance matched-mode tuning fork gyroscope," in *19th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, 2006, pp. 66–69.
- [56] W.-T. Hsu, J. R. Clark, and C. T.-C. Nguyen, "Q-optimized lateral free-free beam micromechanical resonators," in *11th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators*, 2001, pp. 1110–1113.

## Abstract

This dissertation describes the methods of design and fabrication for high-Q MEMS resonator through fused quartz material that shows less thermoelastic energy dissipation than single-crystal-silicon (SCS). On this matter, a guide line of high-Q factor design to reflect thermoelastic damping characteristic of fused quartz material was proposed. Also, quartz/quartz wafer bonding and deep RIE process were developed to fabricate fused quartz MEMS resonators with wafer-level process. Through the design rule and processes, fused quartz based double-ended tuning fork resonators were fabricated. In addition, its Q-values were measured and compared with Q-values of samely designed SCS DETF resonators to demonstrate the improved Q values of the fused quartz MEMS resonators.

We analyzed two major internal energy loss factors such as thermoelastic damping and support damping to extract the high-Q factor design criteria. Then, the overall Q-value characteristics of fixed-fixed bridge type resonators were derived according to length, width and frequency of resonator. The fused quartz DETF resonators were designed to have optimized Q-value. And the Q-factor characteristic about dimension of DETF resonator was validated by finite element analysis.

In order to fabricate the fused quartz DETF resonators through wafer-level process, a low temperature ( $\leq 300$  °C), plasma-

assisted quartz-on-quartz wafer bonding process was set up. Also, the feasibility and reliability of QoQ bonding process was assured through residual stress test, shear bonding strength test, reproducibility test. In addition, for the bonded quartz wafer, DRIE process conditions were induced by several experiments using Ni mask, oxygen-fluorocarbon mixtures. After that, anisotropic dry etching condition (40  $\mu\text{m}$  depth, 3  $\mu\text{m}$  sidewall loss) was established.

The DETF resonator whose structure and basement layers were all made of fused quartz were successfully fabricated and electrostatically driven by driving/sensing circuit. Also, self-oscillation and free ring-down tests were performed to measure Q-values. For the fused quartz resonator specimens, the average Q-factor was measured to be about 84,000 ( $\pm 17,000$ ). For SCS DETF resonator specimens, the average Q-factor was measured to be about 63,000 ( $\pm 7,000$ ). On the base of these results, the high-Q value characteristic of fused quartz material was experimentally verified.

We were able to prove not only the validity of the proposed process, but also the possibility of fabricating high performance devices using fused quartz. This study is expected to contribute to development of a neglected area of research that utilizes fused quartz material.

Keywords: fused quartz, quartz-on-quartz bonding, quartz DRIE, DETF resonator, Q-factor, thermoelastic damping

Student Number : 2009-30194